



7 / Priority  
Doc  
E. Millis  
a-23-01

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re Patent Application of: )  
COFFA ET AL. )  
 )  
Serial No. 09/653,390 )  
 )  
Filing Date: September 1, 2000 )  
 )  
For: SEMICONDUCTOR DEVICE FOR )  
ELECTRO-OPTIC APPLICATIONS, )  
METHOD FOR MANUFACTURING SAID )  
DEVICE AND CORRESPONDING )  
SEMICONDUCTOR LASER DEVICE )  
 )

TRANSMITTAL OF CERTIFIED PRIORITY DOCUMENT

Director, U.S. Patent and Trademark Office  
Washington, D.C. 20231

Sir:

Transmitted herewith is a certified copy of the  
priority European Application No. 99830544.5.

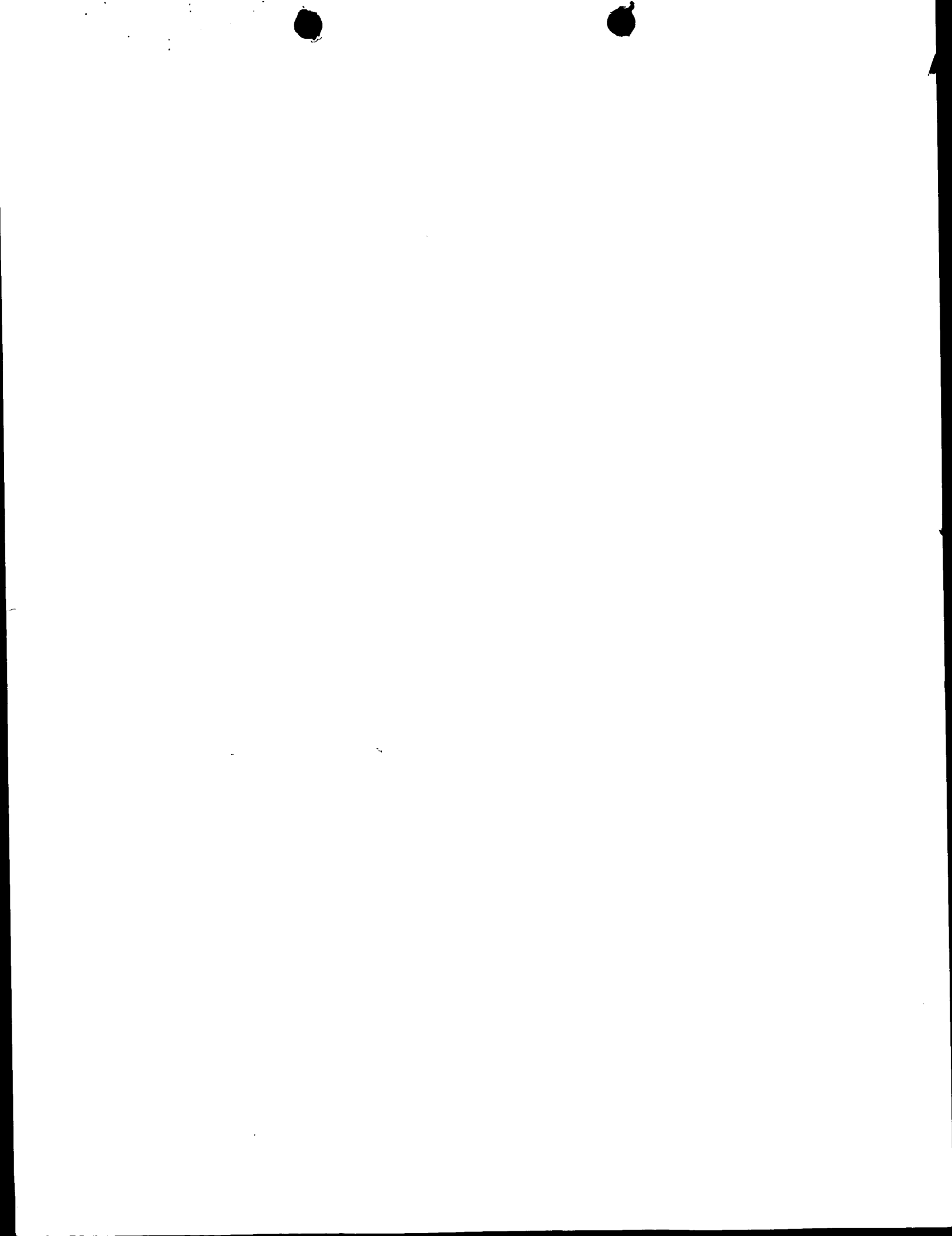
Respectfully submitted,

Michael W. Taylor  
MICHAEL W. TAYLOR  
Reg. No. 43,182  
Allen, Dyer, Doppelt, Milbrath  
& Gilchrist, P.A.  
255 S. Orange Avenue, Suite 1401  
Post Office Box 3791  
Orlando, Florida 32802  
Telephone: 407/841-2330  
Fax: 407/841-2343  
Attorney for Applicants

CERTIFICATE OF MAILING

I hereby certify that this correspondence is being  
deposited with the United States Postal Service as first class  
mail in an envelope addressed to: DIRECTOR, U.S. PATENT AND  
TRADEMARK OFFICE, WASHINGTON, D.C. 20231, on this 28 day of  
December, 2000.

Eric J. [Signature]

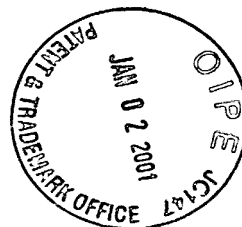




Europäisches  
Patentamt

European  
Patent Office

Office européen  
des brevets



Bescheinigung

Certificate

Attestation

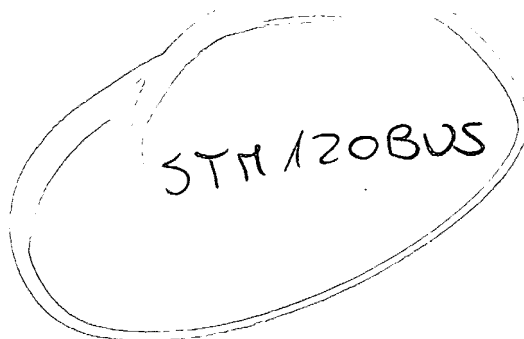
Die angehefteten Unterla-  
gen stimmen mit der  
ursprünglich eingereichten  
Fassung der auf dem näch-  
sten Blatt bezeichneten  
europäischen Patentanmel-  
dung überein.

The attached documents  
are exact copies of the  
European patent application  
described on the following  
page, as originally filed.

Les documents fixés à  
cette attestation sont  
conformes à la version  
initialement déposée de  
la demande de brevet  
européen spécifiée à la  
page suivante.

Patentanmeldung Nr. Patent application No. Demande de brevet n°

99830544.5



Der Präsident des Europäischen Patentamts;  
Im Auftrag

For the President of the European Patent Office

Le Président de l'Office européen des brevets  
p.o.

I.L.C. HATTEN-HECKMAN

DEN HAAG, DEN  
THE HAGUE,  
LA HAYE, LE

26/10/00





Europäisches  
Patentamt

European  
Patent Office

Office européen  
des brevets

**Blatt 2 der Bescheinigung**  
**Sheet 2 of the certificate**  
**Page 2 de l'attestation**

Anmeldung Nr.:  
Application no.: 99830544.5  
Demande n°:

Anmeldetag:  
Date of filing: 02/09/99  
Date de dépôt:

Anmelder:  
Applicant(s):  
Demandeur(s):  
STMicroelectronics S.r.l.  
20041 Agrate Brianza (Milano)  
ITALY  
CNR-IMETEM  
95121 Catania

ITALY  
Bezeichnung der Erfindung:  
Title of the invention:  
Titre de l'invention:

Semiconductor device for electro-optic applications, method for manufacturing said device and corresponding semiconductor laser device

In Anspruch genommene Priorität(en) / Priority(ies) claimed / Priorité(s) revendiquée(s)

Staat:  
State:  
Pays:

Tag:  
Date:  
Date:

Aktenzeichen:  
File no.  
Numéro de dépôt:

Internationale Patentklassifikation:  
International Patent classification:  
Classification internationale des brevets:

H01S3/16, H01S5/32

Am Anmeldetag benannte Vertragsstaaten:  
Contracting states designated at date of filing: AT/BE/CH/CY/DE/DK/ES/FI/FR/GB/GR/IE/IT/LI/LU/MC/NL/PT/SE  
Etats contractants désignés lors du dépôt:

Bemerkungen:  
Remarks:  
Remarques:

The original Italian description was filed together with the English translation on above-mentioned filing date.

The title of the application in Italian reads as follows:

Dispositivo a semiconduttore per applicazioni elettro-ottiche, metodo per produrre untale dispositivo e corrispondente dispositivo laser a semiconduttore.



Titolo: Dispositivo a semiconduttore per applicazioni elettro-ottiche, metodo per produrre un tale dispositivo e corrispondente dispositivo laser a semiconduttore.

### DESCRIZIONE

#### 5 Sfondo dell'invenzione

La presente invenzione riguarda, nel suo aspetto più generale, un dispositivo a semiconduttore per applicazioni elettro-ottiche.

L'invenzione riguarda anche un metodo per produrre un tale dispositivo ed un corrispondente dispositivo laser a semiconduttore.

- 10 Più specificatamente, l'invenzione riguarda un dispositivo a semiconduttore che include almeno una giunzione P/N drogata con ioni delle terre rare integrati su un substrato semiconduttore.

Arte nota

- 15 Com'è ben noto in questo specifico settore tecnico, il silicio semiconduttore è il materiale più comunemente utilizzato per la produzione di avanzati dispositivi elettronici in tecnologia elettronica.

La tecnologia elettronica può essere oramai considerata una tecnologia matura ed una nuova tecnologia di comunicazione ottica sta ora emergendo.

- 20 Per questo genere di tecnologia ottica l'informazione di base è portata da segnali ottici che hanno una lunghezza d'onda standard compresa nell'intervallo tra 1,3 e 1,55 microns.

- 25 Sarebbe altamente desiderabile combinare le funzioni elettroniche ed ottiche nel silicio per implementazioni opto-elettroniche in un singolo dispositivo a semiconduttore. Un progresso significativo è stato fatto di recente nella combinazione di tecnologie elettroniche ed ottiche per la fabbricazione di dispositivi ottici operanti nei pressi della lunghezza d'onda infrarossa.

Alcuni esempi sono i seguenti:

guide d'onda ottiche possono essere realizzate con basse perdite, come descritto da U. Fisher, T. Zinke, J.-R. Kropp, F. Arndt e K. Petermann, nell'articolo IEEE: "Photonics Technology Letters" 8 647 (1996);

5 diodi ad emissione di luce basati sul drogaggio con Erblio (Er) sono stati dimostrati, come riportato da S. Coffa, G. Franzò and F. Priolo, nel bollettino MRS su: "Si-based optoelectronics" 23 n. 4, edito da Materials Research Society, S. Coffa and L. Tsybeskov editori ospiti;

10 commutatori ottici basati su un effetto elettro-ottico sono stati realizzati su silicio, come descritto da A. Cutolo, M. Iodice, P. Spirito e L. Zeni, J. Of lightwave Technology 15, 505 (1997)

Vi è tuttavia una limitazione principale per l'utilizzo del silicio in applicazioni ottiche, come ad esempio connessioni ottiche all'interno dei circuiti o tra circuiti integrati. Questa limitazione principale è dovuta alla mancanza di una sorgente di luce coerente, per esempio un laser  
15 basato su silicio. Il silicio è inadatto ad un'efficiente emissione di luce a causa del suo interspazio di banda indiretto.

Molti approcci sono stati fino ad oggi utilizzati per ovviare a questo inconveniente. L'uso di un drogaggio ottico del silicio, con ioni delle terre rare, con o senza impurità come: O, F, N, presenta molte  
20 interessanti caratteristiche non solo per la fabbricazione di efficienti diodi emettitori di luce, ma anche per cercare di realizzare un laser basato su silicio.

In effetti, un'efficiente elettro-luminescenza a temperatura ambiente da diodi in silicio con co-drogaggio erblio-ossigeno è stata riportata. Inoltre,  
25 il lungo tempo di vita spontaneo del primo stato eccitato dell'erbio (circa 1 ms), può certamente garantire il raggiungimento di un'inversione di popolazione richiesta per un'efficiente emissione di luce.

Per comprendere pienamente tutti gli aspetti della presente invenzione, un diagramma schematico del meccanismo correlato al pompaggio  
30 elettrico degli ioni di erblio è mostrato nelle figure 1, 2a, 2b, 3a e 3b.

Un'elettro-luminescenza a temperatura ambiente e a  $1.54 \mu\text{m}$  di lunghezza d'onda può essere ottenuta quando gli ioni di erblio sono incorporati in una giunzione p-n di diodo.



Una soluzione nota è descritta ad esempio nel brevetto US No. 5,107,538 che riguarda un sistema di guida d'onda ottico comprendente un dispositivo ottico basato su silicio drogato con terre rare.

5 Questo dispositivo, tuttavia, produce una luminescenza solo alla temperatura di 4 K e l'efficienza dell'emissione di luce è estremamente ridotta a temperatura ambiente. Inoltre, nessun insegnamento può essere rintracciato in questo documento circa la localizzazione degli ioni delle terre rare nella giunzione.

10 Pertanto, l'emissione di luce ottenuta tramite questa tecnologia è insufficiente per implementare dispositivi commerciali e sul mercato non sono noti prodotti elettro-ottici su silicio.

Uno scopo della presente invenzione è quello di mettere a disposizione un nuovo dispositivo a semiconduttore avente caratteristiche strutturali e funzionali tali da consentire di implementare una sorgente di  
15 emissione di luce coerente all'interno di un substrato semiconduttore che include una giunzione drogata con ioni delle terre rare.

Un ulteriore scopo dell'invenzione è quello di mettere a disposizione mezzi per consentire connessioni ottiche tra circuiti integrati o all'interno di circuiti integrati.

20 Un ulteriore scopo dell'invenzione è quello di fornire un dispositivo laser a semiconduttore integrato su un singolo chip.

Un altro scopo della presente invenzione è quello di mettere a disposizione un nuovo dispositivo a semiconduttore avente caratteristiche strutturali e funzionali tali da consentire di  
25 implementare una sorgente di emissione di luce coerente in silicio.

Un ulteriore scopo dell'invenzione è quello di fornire un dispositivo laser al silicio integrato su un singolo chip.

Inoltre, lo scopo dell'invenzione è quello di fornire un amplificazione  
30 ottica pompata elettricamente ed un'azione laser a temperatura ambiente.

#### Sommario dell'invenzione

L'idea di soluzione che sta alla base dell'invenzione è quella di ottenere un'amplificazione ottica a pompaggio elettronico, e un'azione laser utilizzando silicio cristallino drogato con erbio. Il dispositivo a semiconduttore secondo l'invenzione comprende una giunzione p-n drogata con erbio e integrata all'interno di una cavità o guida d'onda a semiconduttore.

L'invenzione consente di combinare l'eccitazione d'impatto degli ioni di erbio tramite i portatori caldi nello strato depleto di una giunzione polarizzata inversamente ed avente un opportuno drogaggio di erbio e distribuzione del campo elettrico.

Un applicazione elettro-ottica viene resa possibile dall'incorporazione di tutti gli ioni di erbio all'interno dello strato depleto del dispositivo a semiconduttore fornendo anche un'opportuna accelerazione dei portatori prima che essi entrino nella regione depleta drogata con erbio.

In accordo con questa idea di soluzione, l'invenzione riguarda un dispositivo a semiconduttore definito dalla qui allegata rivendicazione 1.

Questa invenzione riguarda anche un dispositivo laser a semiconduttore secondo la rivendicazione 11.

Inoltre, l'invenzione riguarda un metodo per fabbricare un dispositivo e semiconduttore come definito nella rivendicazione 21.

Le caratteristiche ed i vantaggi del dispositivo e del corrispondente metodo di fabbricazione secondo l'invenzione appariranno chiaramente dalla seguente descrizione data a titolo indicativo e non limitativo con riferimento ai disegni allegati.

#### Breve descrizione dei disegni

La Figura 1 mostra un diagramma schematico dei livelli elettronici 4f di uno ione di erbio e della transizione che dà origine ad un'emissione di luce a 1.54  $\mu\text{m}$ ;

Le Figure 2a e 2b mostrano il meccanismo di eccitazione per gli ioni delle terre rare nel silicio cristallino, viene illustrato il caso specifico dell'erbio;

Le Figure 3a e 3b mostrano il meccanismo di diseccitazione per gli ioni delle terre rare nel silicio cristallino;

Le Figure da 4 a 8 sono sezioni schematiche di un dispositivo semiconduttore secondo l'invenzione durante le fasi successive del suo  
5 processo di fabbricazione;

La Figura 9 mostra una vista prospettica e in sezione di un dispositivo a semiconduttore secondo la presente invenzione;

La Figura 10 è una sezione verticale e schematica del dispositivo a semiconduttore di figura 9 con evidenziata la localizzazione degli ioni  
10 delle terre rare richiesta per conseguire l'azione laser della presente invenzione;

la Figura 11 mostra una vista schematica di una regione scura nella parte centrale dello strato depleto quando gli ioni di erbio sono pompati per eccitazione da impatto secondo l'arte nota;

15 La Figura 12 mostra un diagramma della concentrazione di drogaggio rispetto alla profondità del drogaggio stesso per il dispositivo a semiconduttore secondo la presente invenzione;

la Figura 13 mostra un diagramma del campo elettrico rispetto alla profondità di drogaggio per il dispositivo a semiconduttore secondo la  
20 presente invenzione.

#### Descrizione dettagliata

Con riferimento ai disegni allegati, con 1 è globalmente e schematicamente indicato un dispositivo a semiconduttore realizzato secondo la presente invenzione per applicazioni elettro-ottiche. Il  
25 materiale semiconduttore della presente invenzione è preferibilmente silicio.

Verrà ora descritto il processo per fabbricare il dispositivo a semiconduttore. Le caratteristiche specifiche del dispositivo a semiconduttore 1 verranno descritte in seguito per convenienza di  
30 descrizione.

Il processo di fabbricazione viene descritto qui di seguito passo dopo passo.

Un wafer SOI (Silicon-On-Insulator) viene fornito per essere utilizzato come substrato 2 per il dispositivo a semiconduttore 1 secondo l'invenzione.

5 Una nota tecnologia SIMOX o BESOI può essere utilizzata per ottenere il wafer SOI.

Tuttavia, al posto di utilizzare un wafer SOI, il substrato per il dispositivo a semiconduttore 1 può semplicemente comprendere un doppio strato di materiale semiconduttore, per esempio un primo substrato a più elevato drogaggio e un secondo e sovrapposto strato  
10 epitassiale a drogaggio inferiore. In questo caso, il substrato inferiore avrebbe un più basso indice di rifrazione e fungerebbe da strato riflettente per la luce incidente.

Il substrato SOI 2 è formato da: un primo strato monocristallino 3 inferiore, uno strato di ossido 4, e un secondo e superiore strato  
15 monocristallino 5. Il primo ed il secondo strato monocristallino possono essere drogati con un drogante avente un primo tipo di conducibilità, ad esempio di tipo N.

Il secondo strato superiore 5 è meno drogato del primo strato inferiore 3.

20 Uno strato di ossido 7 viene cresciuto al di sopra della superficie del substrato 2, vale a dire al di sopra del secondo strato superiore monocristallino 5.

Una fase di processo fotolitografica è prevista quindi per definire un'apertura 8 in detto strato di ossido 7 e per realizzare selettivamente  
25 una regione drogata 10. Il drogante utilizzato per questa regione 10 ha una conducibilità di tipo opposto, ad esempio di tipo P.

Una fase di impiantazione mascherata di ioni di Boro nello strato superiore 5 consente di realizzare questa regione 10 a drogaggio p+, come mostrato in figura 5.

30 Tramite la stessa maschera viene formata una regione 9 drogata con ioni delle terre rare. Per esempio, una fase di processo di impiantazione di ioni viene eseguita per ottenere una regione 9 al di sotto di detta regione 10 a drogaggio p+, come mostrato in figura 5. Preferibilmente,

detti ioni delle terre rare sono selezionati da un gruppo comprendente erbio (Er). Un opportuno co-drogaggio con altre impurità, come ad esempio O, F, N, può anche essere utilizzato.

5 L'incorporazione delle terre rare (RE) può essere conseguita utilizzando tecniche differenti come: l'impiantazione di ioni; l'epitassia molecolare da raggio (Molecular Beam Epitaxy =MBE), deposizione chimica da vapore (Chemical Vapor Deposition =CVD), deposizione di ioni assistita, ricrescita epitassiale su silicio o drogaggio poco profondo con ioni RE. Ovviamente, tecniche differenti possono richiedere differenti passi di  
10 processo.

La regione 9 è una regione a drogaggio N e la pila formata dalle regioni 5, 9 e 10 forma sostanzialmente una giunzione PN di diodo.

15 Il tecnico del ramo può apprezzare che la struttura di dispositivo a semiconduttore della presente invenzione è simile alla giunzione base-collettore di un transistor bipolare.

Vantaggiosamente, secondo l'invenzione, tutti gli ioni di erbio sono incorporati nello strato depleto della giunzione PN formata dalle regioni 5, 9 e 10, come chiaramente mostrato in figura 13. In alternativa, tutti gli ioni di erbio impiantati sono incorporati nella regione depleta della  
20 regione di base-collettore di detto transistor bipolare.

Un fase di processo di attacco mascherato viene successivamente eseguita per proteggere le regioni impilate 5, 9 e 10 e per attaccare il semiconduttore da entrambi i lati delle regioni 9 e 10 al fine di formare una regione aggettante 6 comprendente proprio la regione 10 a  
25 drogaggio p+ e parte della regione 5.

Un incisione a secco o in umido può anche essere utilizzata per attaccare il semiconduttore.

Uno strato protettivo di ossido 11 è depositato sulla pila risultante, come mostrato in figura 6.

30 Questo strato protettivo 11 consente di avvolgere la pila 6 formata dalle regioni 5, 9 e 10 con un materiale che ha un'inferiore costante dielettrica.

Come risultato, una cavità laser o una guida d'onda viene ottenuta su silicio con lo strato 11 di ossido che delimita i lati della guida d'onda e lo strato sepolto 4 di ossido che delimita il fondo della guida d'onda.

Il dispositivo ottenuto con il metodo secondo l'invenzione consente di  
5 confinare la luce in un piano bidimensionale perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda elettromagnetica. Pertanto, la regione di semiconduttore che contiene il mezzo di guadagno, vale a dire la concentrazione di ioni di erbio, è circondata da una struttura a cavità o da una guida d'onda delimitata da un materiale avente un basso  
10 indice di rifrazione.

Abbiamo descritto un esempio per ottenere una guida d'onda avente una struttura a nervatura allungata come mostrato in figura 9. Tuttavia, altri esempi possono essere proposti di guide d'onda planari nelle quali il confinamento laterale viene ottenuto per esempio con  
15 trincee riempite con un materiale a basso indice di rifrazione o da regioni pesantemente drogate come una delle molteplici e possibili alternative.

Il processo di fabbricazione viene portato avanti tramite un'ulteriore fase di impiantazione mascherata con droganti di tipo N.

20 Utilizzando una maschera opportuna, non mostrata, una porzione dello strato protettivo 11 di ossido viene rimossa al di sopra dello strato 5 di substrato 11 nei pressi della pila 6. I droganti di tipo N, ad esempio ioni P, vengono impiantati nello strato superiore 5 formando regioni di contatto N+ 19, come mostrato in figura 7.

25 Un ulteriore strato di ossido viene depositato al di sopra dell'intera porzione della struttura del semiconduttore ed una fase di processo mascherata viene utilizzata per definire aperture di contatto al di sopra della regione p+ 10 e al di sopra delle regioni n+ 19.

30 Una fase di deposizione finale di uno strato metallico, seguita da una fase di litografia, viene eseguita per definire i contatti metallici sulle regioni p+ ed n+ 10 e 19 come mostrato in figura 8.

La struttura risultante è chiaramente mostrata in figura 9 che una sezione verticale schematica e prospettica del dispositivo a

semiconduttore 1 includente una cavità o guida d'onda e una giunzione p-n di diodo.

Valutiamo ora le caratteristiche specifiche del dispositivo a semiconduttore ottenuto secondo il processo precedentemente descritto.

- 5 Gli ioni di erbio possono effettivamente essere pompati per ricombinazione elettrone-lacuna (e-h), in operazioni a polarizzazione diretta, e ad una temperatura inferiore ai 200 K. Tuttavia, un fenomeno noto come diseccitazione di Auger con trasferimento di energia di ritorno riduce di molto l'efficienza dell'emissione di luce a temperature  
10 più elevate.

Secondo l'invenzione, questi effetti negativi sono totalmente inibiti sotto condizioni di polarizzazione inversa consentendo di conseguenza di ottenere una forte emissione di luce a temperatura ambiente.

- Infatti, tutti gli ioni di erbio sono incorporati nello strato depleto di una  
15 giunzione p-n o, in alternativa, nello strato depleto della regione di base-collettore di un transistor bipolare.

- Dal momento che la caratteristica dell'invenzione è quella di incorporare gli ioni delle terre rare nello strato depleto, il pompaggio elettrico di questi ioni può essere ottenuto in diverse strutture di dispositivo come:  
20 diodi Schottky, transistori bipolari, dispositivi MOSFET ecc....

- Inoltre, un sufficiente spazio di accelerazione è previsto prima che i portatori, sia generati per effetto tunneling nella giunzione p-n polarizzata inversamente, sia iniettati dalla giunzione base-emettitore di un transistor, entrino nella regione drogata con erbio. Seguendo  
25 questo approccio, l'inversione di popolazione viene estesa a tutti gli ioni di erbio.

Dopo aver ottenuto un effetto operativo laser a temperatura ambiente, un efficiente effetto di pompaggio elettronico può essere mantenuto a temperatura ambiente secondo la presente invenzione.

- 30 Pertanto, secondo l'invenzione, un vero e proprio dispositivo laser a semiconduttore può essere realizzato incorporando gli ioni delle terre rare in una cavità laser che presenta basse perdite alla lunghezza d'onda di emissione.

A tale riguardo, l'uso di un substrato di silicio è certamente un vantaggio dal momento che il silicio semiconduttore è pressoché trasparente alla lunghezza d'onda di 1.54. In effetti, guide d'onda integrate che utilizzano il silicio come materiale di base e l'ossido di silicio (SiO<sub>2</sub>) come ricopertura sono già state realizzate e presentano perdite di circa 0.1 dB/cm.

Secondo l'invenzione, il drogaggio con ioni delle terre rare di queste guide d'onda, all'interno di una struttura integrata che consente il pompaggio degli ioni delle terre rare, può essere utilizzata per produrre la cavità del laser.

L'azione di un diodo nei pressi della soglia di rottura risulta in un'intensa emissione di luce alla lunghezza d'onda di 1.54  $\mu$ m, e caratterizzata da un'efficienza quantica di circa 0.1 %.

Può essere dimostrato che in una tale struttura gli ioni di erbio sono pompati al livello di eccitazione come risultato dell'eccitazione di impatto da parte dei portatori caldi.

L'eccitazione d'impatto con portatori caldi viene prevista per invertire la popolazione di erbio piuttosto che con ricombinazione elettrone-lacuna.

Durante il pompaggio, poiché gli ioni di erbio sono incorporati nello strato depleto della giunzione, le perdite dovute agli elettroni liberi sono totalmente inibite e l'azione laser beneficerebbe di perdite estremamente basse che il silicio manifesta intrinsecamente a 1.54  $\mu$ m.

Questo guadagno di amplificazione a 1.54  $\mu$ m può superare le perdite della guida d'onda e l'azione laser può essere conseguita se un'opportuna struttura riflettente può essere realizzata, come il metodo secondo l'invenzione ha dimostrato.

A fine di rimarcare come ottenere un'adeguata azione laser, si fa ancora riferimento alla vista schematica di figura 9. Il dispositivo a semiconduttore 1 è realizzato utilizzando un substrato 2 di silicio su isolante (SOI) ed il processo precedentemente descritto. La giunzione p-n impilata è drogata con gli ioni delle terre rare. Il pompaggio dell'erbio ha come risultato un'emissione di luce accoppiata ai modi fondamentali della cavità. Questa struttura può essere utilizzata come



amplificatore ottico a pompaggio elettronico o come laser, se un opportuna retroazione può essere conseguita. L'uscita e l'ingresso sfaccettato della guida d'onda, o le strutture distribuite di riflessione Bragg, possono opportunamente essere utilizzate per fornire le  
5 retroazione richiesta per l'azione laser.

La più importante limitazione che l'invenzione ha superato era dovuta ad un'insufficiente concentrazione di ioni di erbio al fine di ottenere un'azione laser a  $1.54 \mu\text{m}$  in un substrato di silicio drogato con erbio che utilizza una guida d'onda integrata.

10 Dal momento che il silicio e l'erbio agiscono come donatori, un'elevata concentrazione di elettroni liberi è presente nella regione dove si trova l'erbio. Dev'essere notato che, al fine di incorporare un'elevata concentrazione di erbio nel silicio semiconduttore il co-drogaggio con impurità come O e F gioca un ruolo fondamentale. Tuttavia, questo co-  
15 drogaggio produce anche una forte attività dei donatori degli ioni di erbio che risulta in un'elevata concentrazione di elettroni liberi nella regione dove l'erbio è situato.

Quando l'erbio è incorporato nella struttura, come nella guida d'onda precedentemente descritta, la forte concentrazione di elettroni liberi  
20 produce, per effetto dispersivo in plasma, una forte perdita che rende impossibile il raggiungimento di un guadagno netto. In effetti, la concentrazione dei portatori liberi dev'essere mantenuta al di sotto dei  $10^{17}/\text{cm}^3$  per conseguire basse perdite.

Infatti, a causa del comportamento dei donatori dell'erbio, sia la parte  
25 immaginaria sia la parte reale dell'indice di rifrazione sono altamente affetti dall'alta concentrazione di portatori liberi, e la specie tende a fuggire dalla regione in cui è situato l'erbio. Inoltre, perdite effettive di almeno  $\sim 200 \text{ cm}^{-1}$  possono essere ottenute.

Un problema da risolvere risulta dall'uso dell'eccitazione da impatto  
30 degli ioni di erbio in polarizzazione inversa della giunzione p-n a causa dell'esistenza di una regione "scura" nella zona centrale della regione depleta in cui i portatori di carica non hanno energia sufficiente per pompare gli ioni di erbio.

E' stato però sperimentalmente dimostrato da: S. Coffa, G. Franzò, F. Priolo, A. Pacelli, A. Lacaita, in Appl. Phys. Lett. 73, 93 (1998) che una regione di circa 400 Å nella porzione centrale avente spessore di circa 1000 Å è scura.

5 Questo comportamento è schematicamente mostrato in figura 11. Infatti, la caratteristica peculiare dell'eccitazione da impatto è data dall'esistenza di una soglia. Se l'energia dei portatori è inferiore a quella richiesta per promuovere gli ioni di erbio nel primo stato di eccitazione (0.8 eV) il fenomeno non può avvenire.

10 Un secondo problema è che gli ioni di erbio che stanno al di fuori dello strato depleto non possono essere pompati con questo meccanismo, quindi non saranno eccitati, ma assorbirebbero luce a 1.54 µm.

La popolazione degli ioni di erbio non può quindi essere invertita nella porzione centrale del diodo in quanto là l'energia dei portatori, prodotta  
15 da band to band tunneling e poi accelerata dal forte campo elettrico presente alla giunzione, non è sufficiente per pompare gli ioni di erbio.

Un effettivo pompaggio degli ioni di erbio al fine di ottenere un'inversione della popolazione e la capacità di mantenere basse perdite viene conseguita con la struttura secondo l'invenzione. Come  
20 l'invenzione risolve i suddetti problemi viene riassunto qui di seguito.

Il dispositivo ed il metodo secondo l'invenzione risolvono tutti i problemi precedentemente rimarcati incorporando tutti gli ioni impiantati di erbio nello strato depleto della giunzione p-n e nel prevedere:

1. Un sufficiente spazio di accelerazione prima che i portatori di carica  
25 entrino nella regione drogata con erbio.
2. Un inversione di popolazione estesa a tutti gli ioni di erbio.
3. Un'inibizione di perdite dovute agli elettroni liberi proprio a causa del fatto che gli ioni di erbio sono incorporati nello strato depleto della  
giunzione. L'azione del laser beneficia di perdite intrinseche  
30 estremamente basse che il silicio esibisce a 1.54 µm. L'erbio è stato posto dove il massimo della specie risiede.

Dal momento che gli ioni di erbio sono situati nella regione depleta, la concentrazione dei portatori di carica si riduce fortemente ed una perdita effettiva inferiore a  $0.6 \text{ cm}^{-1}$  è stata rilevata.

### RIVENDICAZIONI

1. Dispositivo a semiconduttore per applicazioni elettro-ottiche del tipo includente almeno una giunzione P/N drogata con ioni delle terre rare su un substrato semiconduttore, una cavità o guida d'onda e una sorgente di luce coerente, caratterizzato dal fatto che detta sorgente di luce coerente è ottenuta incorporando detti ioni delle terre rare nello strato depleto di detta giunzione P/N.
2. Dispositivo a semiconduttore secondo la rivendicazione 1, in cui detta giunzione P/N è polarizzata inversamente.
3. Dispositivo a semiconduttore secondo la rivendicazione 1, in cui detta giunzione P/N drogata con ioni delle terre rare è la regione di base-collettore di un transistor bipolare.
4. Dispositivo a semiconduttore secondo la rivendicazione 1, in cui detti ioni delle terre rare sono ioni di erbio.
5. Dispositivo a semiconduttore secondo la rivendicazione 1, in cui detta cavità o guida d'onda include detta giunzione P/N ed è parzialmente avvolta da uno strato protettivo avente una costante dielettrica inferiore rispetto a detta giunzione.
6. Dispositivo a semiconduttore secondo la rivendicazione 1, in cui uno strato sepolto riflettente è previsto per delimitare inferiormente detta guida d'onda.
7. Dispositivo a semiconduttore secondo la rivendicazione 1, in cui detto substrato semiconduttore è un substrato SOI.
8. Dispositivo a semiconduttore secondo la rivendicazione 1, in cui detto substrato semiconduttore è uno strato epitassiale coprente un substrato più pesantemente drogato.
9. Dispositivo a semiconduttore secondo la rivendicazione 1, in cui detta cavità o guida d'onda ha una struttura a nervatura allungata aggettante dalla superficie del semiconduttore.
10. Dispositivo a semiconduttore secondo la rivendicazione 1, in cui detto semiconduttore è silicio.

11. Dispositivo laser a semiconduttore comprendente almeno una giunzione P/N drogata con ioni delle terre rare su un substrato semiconduttore, una cavità o guida d'onda ed una sorgente di luce coerente, caratterizzato dal fatto che detto dispositivo comprende un  
5 dispositivo di polarizzazione e che incorpora detti ioni delle terre rare nello strato depleto di detta giunzione P/N.
12. Dispositivo laser a semiconduttore secondo la rivendicazione 11, in cui detto dispositivo di polarizzazione è un transistor bipolare e detta giunzione P/N è la regione di base-collettore di detto  
10 transistor bipolare.
13. Dispositivo laser a semiconduttore secondo la rivendicazione 11, in cui detta giunzione P/N è polarizzata inversamente.
14. Dispositivo laser a semiconduttore secondo la rivendicazione 11, in cui detti ioni delle terre rare sono ioni di erbio.
- 15 15. Dispositivo laser a semiconduttore secondo la rivendicazione 11, in cui detta cavità o guida d'onda include detta giunzione P/N ed è parzialmente avvolta da uno strato protettivo avente una costante dielettrica inferiore rispetto a detta giunzione.
16. Dispositivo laser a semiconduttore secondo la rivendicazione 11,  
20 in cui detta cavità o guida d'onda ha una struttura a nervatura allungata aggettante dalla superficie del semiconduttore.
17. Dispositivo laser a semiconduttore secondo la rivendicazione 11, in cui detto substrato semiconduttore è un substrato SOI.
18. Dispositivo laser a semiconduttore secondo la rivendicazione 11,  
25 detto substrato semiconduttore è uno strato epitassiale coprente un substrato più pesantemente drogato.
19. Dispositivo laser a semiconduttore secondo la rivendicazione 11, in cui uno strato sepolto riflettente è previsto per delimitare inferiormente detta guida d'onda.
- 30 20. Dispositivo laser a semiconduttore secondo la rivendicazione 11, in cui detto semiconduttore è silicio.

21. Un metodo per fabbricare un dispositivo a semiconduttore per applicazioni elettro-ottiche del tipo includente almeno una giunzione P/N drogata con ioni delle terre rare su un substrato semiconduttore, caratterizzato dal fatto di prevedere una cavità o guida d'onda in detto substrato semiconduttore e una sorgente di emissione di luce coerente che incorpora detti ioni delle terre rare nello strato depleto di detta giunzione P/N.
22. Metodo secondo la rivendicazione 21, in cui un dispositivo di polarizzazione viene anche previsto per polarizzare detta giunzione P/N.
23. Metodo secondo la rivendicazione 22, in cui detto dispositivo di polarizzazione è un transistor bipolare e che detta giunzione P/N drogata con ioni delle terre rare forma la regione di base-collettore di detto transistor bipolare.
24. Metodo secondo la rivendicazione 21, in cui detti ioni delle terre rare sono ioni erbio.
25. Un metodo per fabbricare un dispositivo laser a semiconduttore per applicazioni elettro-ottiche, detto dispositivo includente almeno una giunzione P/N drogata con ioni delle terre rare integrata su un substrato semiconduttore, caratterizzato dal fatto di prevedere una cavità o guida d'onda in detto substrato semiconduttore ed una sorgente di emissione di luce coerente comprendente un dispositivo di polarizzazione ed una concentrazione di detti ioni delle terre rare nello strato depleto di detta giunzione P/N.
26. Metodo secondo la rivendicazione 25, in cui detto dispositivo di polarizzazione è un transistor bipolare e che detta giunzione P/N drogata con ioni delle terre rare forma la regione di base-collettore di detto transistor bipolare.
27. Metodo secondo la rivendicazione 25, in cui detti ioni delle terre rare sono ioni di erbio.

**RIASSUNTO**

L'invenzione riguarda un dispositivo a semiconduttore per applicazioni elettro-ottiche del tipo includente almeno una giunzione P/N drogata con ioni delle terre rare su un substrato semiconduttore. Questo dispositivo può essere utilizzato per ottenere un'azione laser in silicio a comprende una cavità o guida d'onda e una sorgente di luce coerente ottenuta incorporando gli ioni delle terre rare, ed in particolare ioni di erbio, nello strato depleto di detta giunzione P/N.

La giunzione può essere ad esempio la regione di base-collettore di un transistor bipolare ed è polarizzata inversamente.

(Fig. 9)





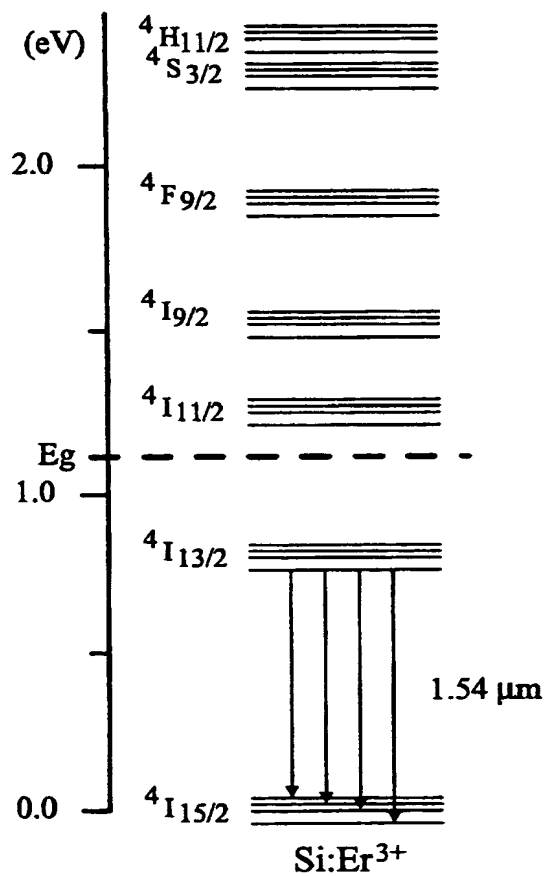


Fig. 1

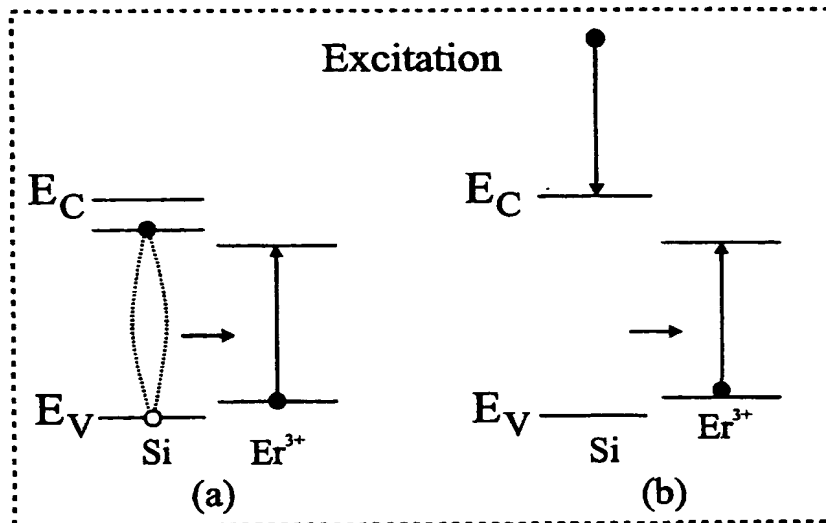


Fig. 2

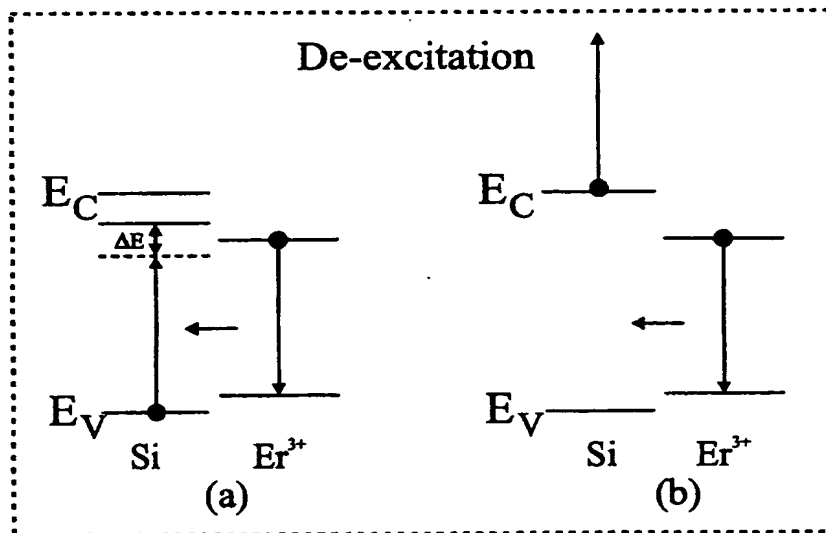


Fig. 3

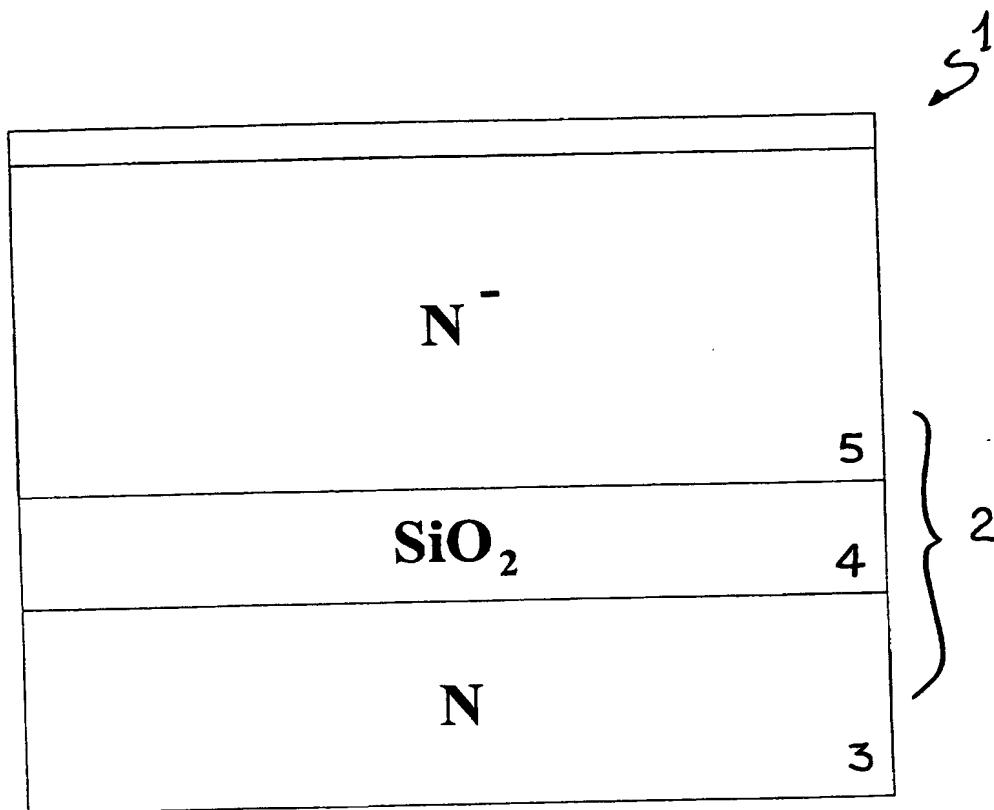


Fig. 4

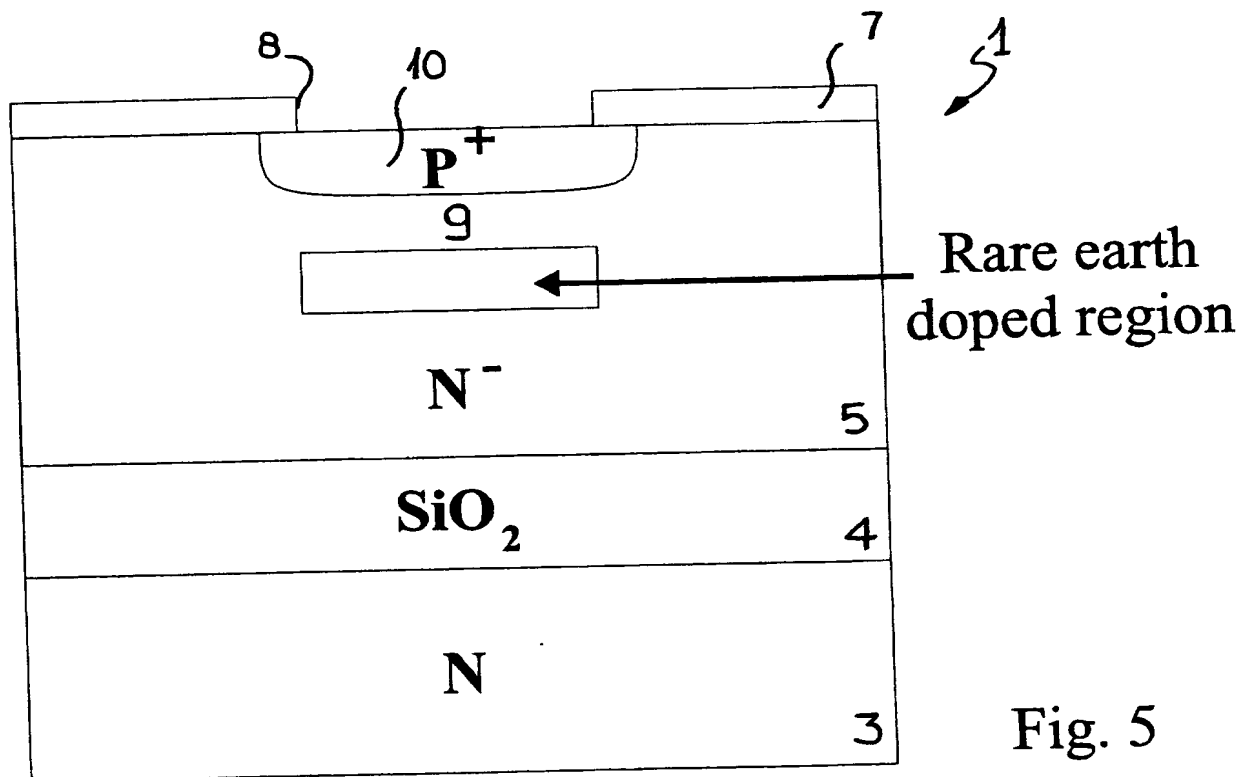


Fig. 5

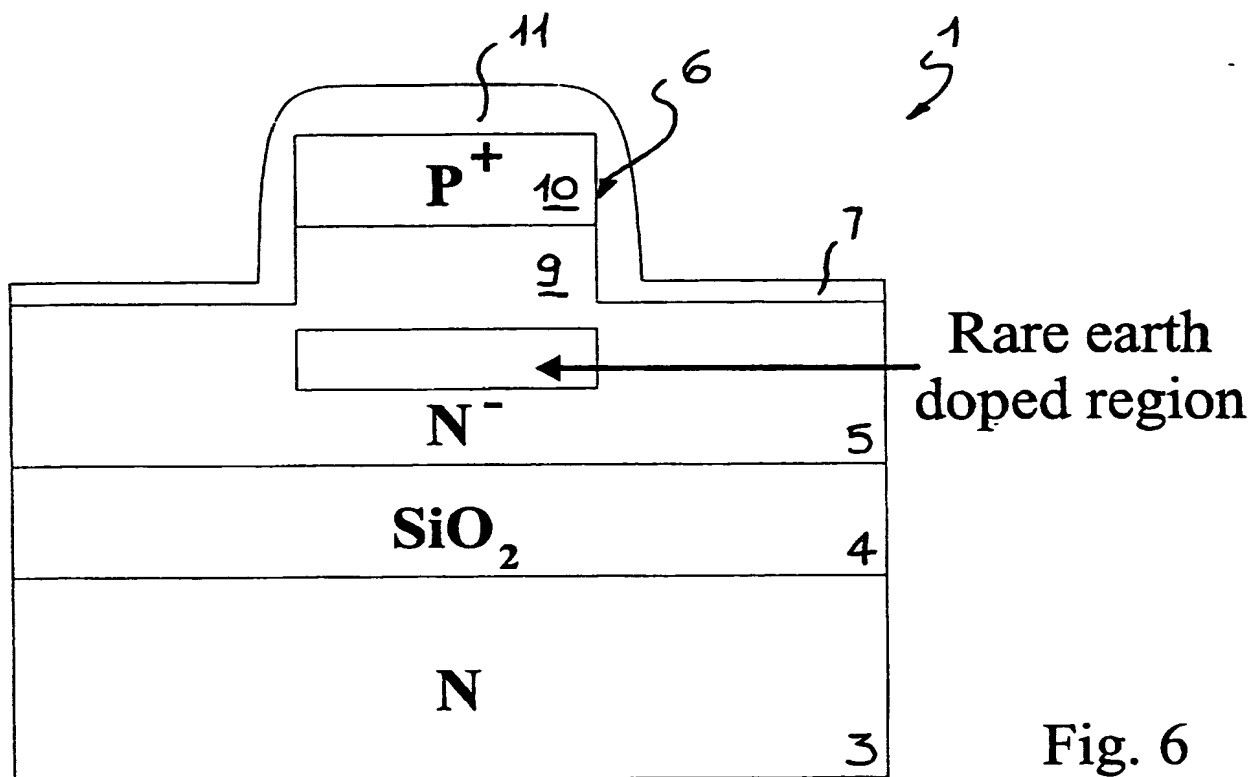


Fig. 6

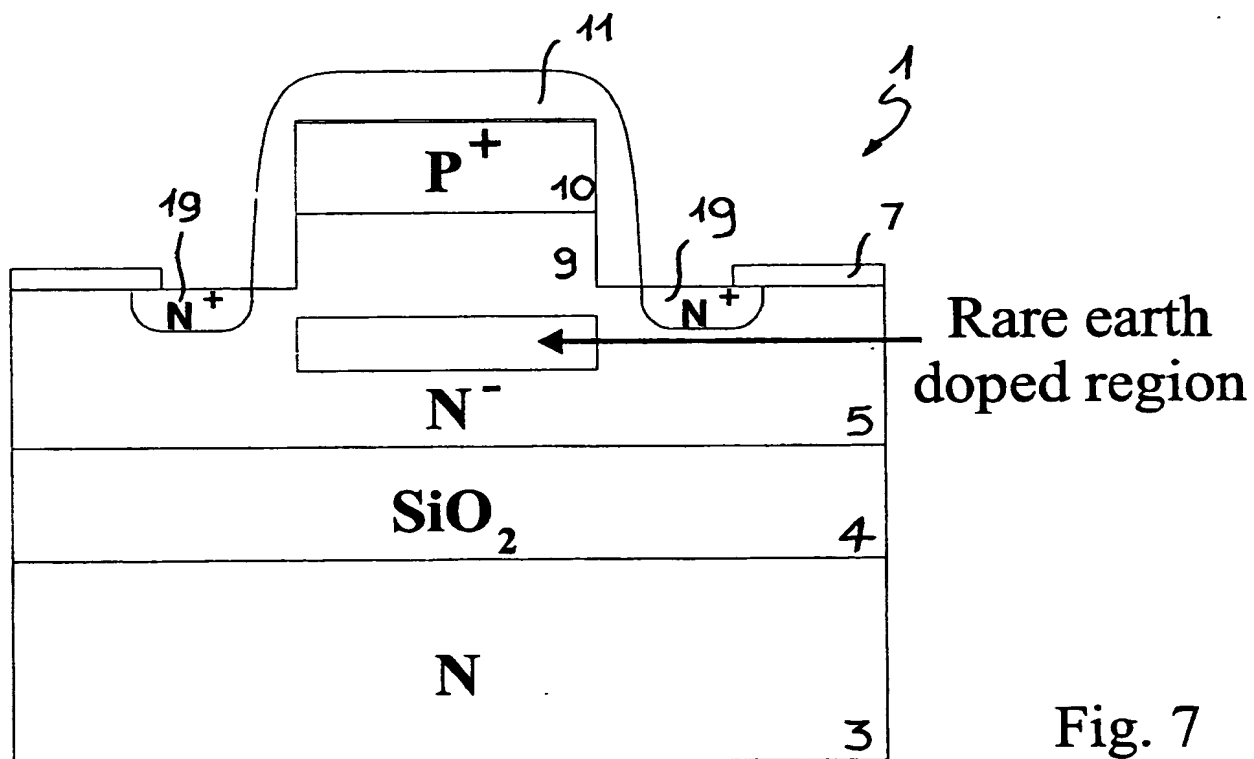


Fig. 7

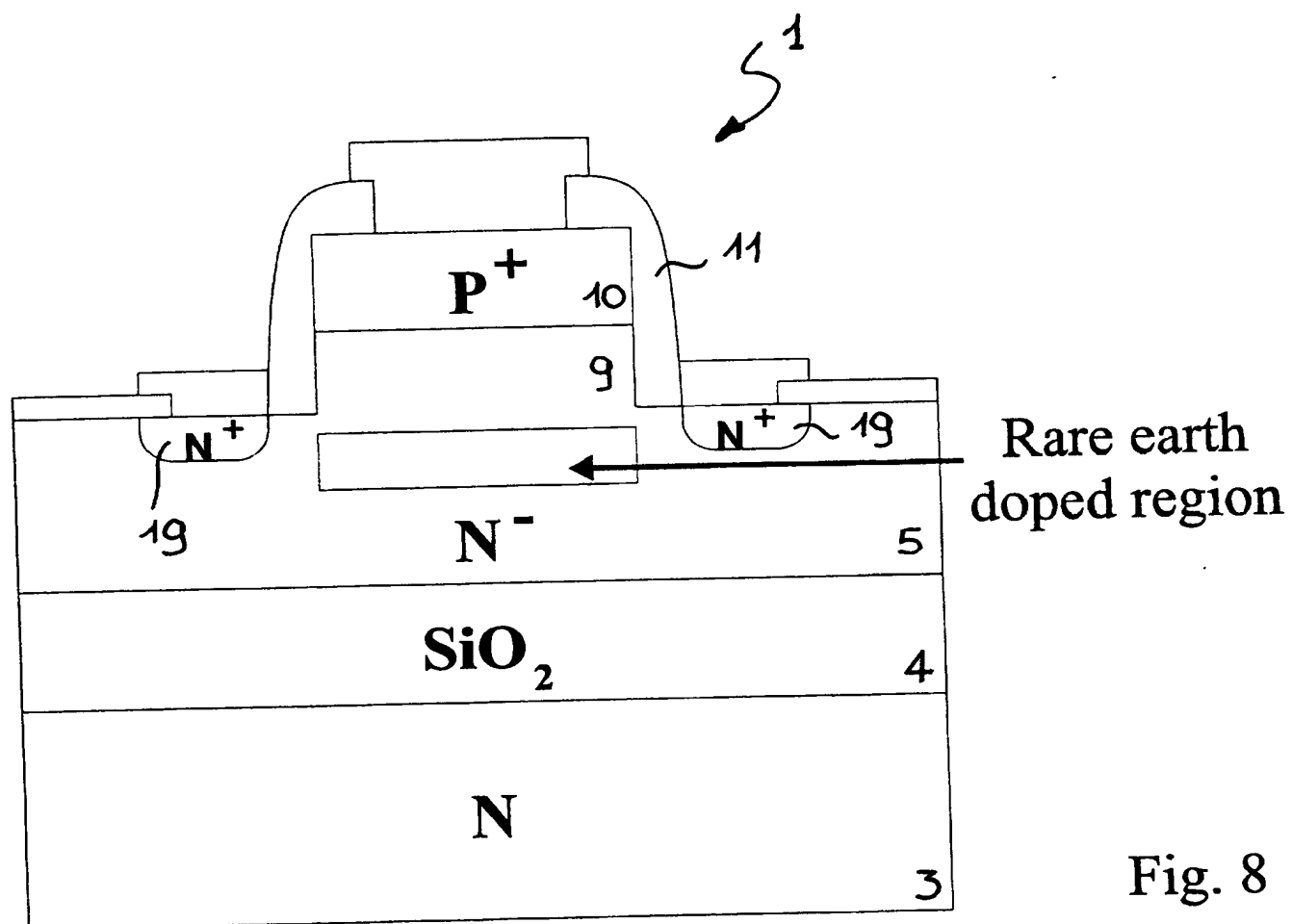


Fig. 8

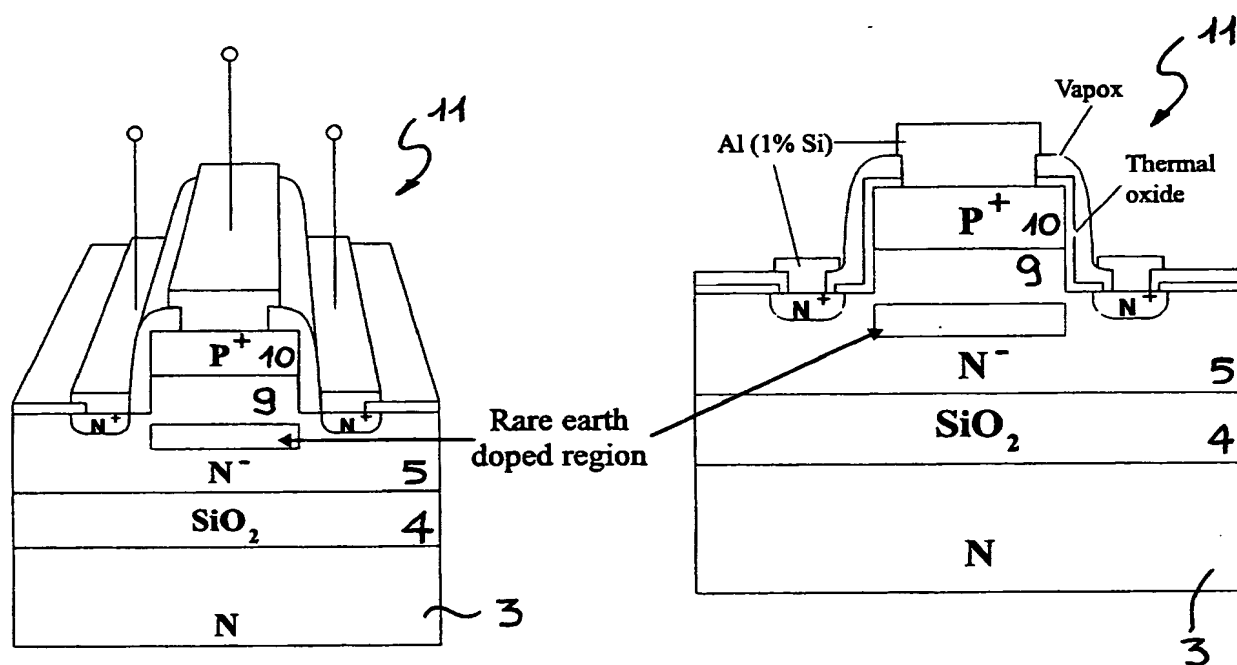


Fig. 9

Fig. 10

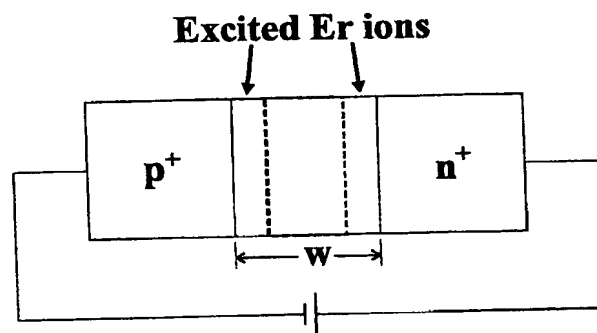


Fig. 11

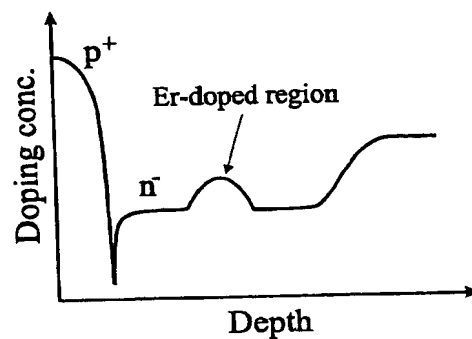


Fig. 12

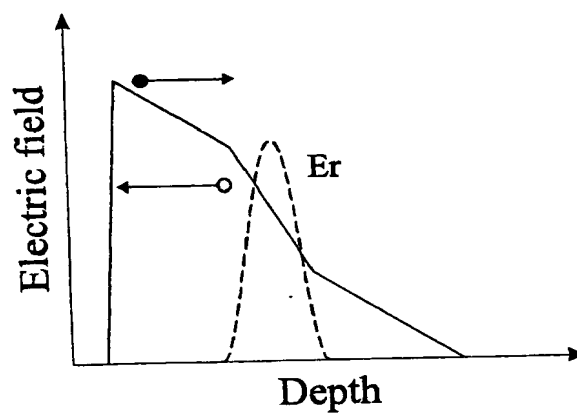


Fig. 13

Title: Semiconductor device for electro-optic applications, method for manufacturing said device and corresponding semiconductor laser device.

### DESCRIPTION

#### 5 Background of the invention

The present invention relates in its more general aspect to a semiconductor device for electro-optic applications.

10 The invention relates also to a method for manufacturing said semiconductor device and to a corresponding semiconductor laser device.

More specifically, the invention relates to a semiconductor device including at least a rare-earth ions doped P/N junction integrated on a semiconductor substrate.

#### Prior Art

15 As it is well known in this specific technical field, Silicon semiconductor is the material most commonly used for manufacturing advanced microelectronic devices in electronic technology.

The electronic technology may be considered nowadays mature and a new optical communication technology is emerging.

20 For this kind of optical technology the basic information is carried by optical signals having standard wavelengths comprised in the range between 1.3 and 1.55 microns.

It would be highly desirable to combine optical and electronic functions in silicon to implement opto-electronic applications in a single  
25 semiconductor device. A significant progress has recently been made in the combination of electronic and optical technologies for manufacturing semiconductor optical devices operating at near infrared wavelengths.

Few examples are the following :

optical waveguides can be made with low losses, as disclosed by U. Fisher, T. Zinke, J.-R. Kropp, F. Arndt and K. Petermann, in the IEEE article: "Photonics Technology Letters" 8 647 (1996);

light emitting diodes based on Erbium (Er) doping have been demonstrated, as reported by S. Coffa, G. Franzò and F. Priolo, in the MRS Bulletin on "Si-based optoelectronics" 23 n. 4, edited by Materials Research Society, S. Coffa and L. Tsybeskov guest editors;

optical switches based on an electro-optic effect can be realized on Silicon, as disclosed by A. Cutolo, M. Iodice, P. Spirito and L. Zeni, J. of lightwave Technology 15, 505 (1997)

There is however a main limitation for using Silicon in optical applications such as, for example, optical interconnections intra-chip or between chips. This main limitation is due to the lack of a coherent light source, i.e. a Silicon-based laser. Silicon is unsuitable to an efficient light emission due to its indirect band gap.

Several approaches are nowadays used to try to overcome this problem. The use of optical doping of Silicon with rare earth ions, with or without impurities such as O, F, N, presents several interesting features not only for manufacturing efficient light emitting diodes, but also for the attempt of realising a Silicon-based lasers.

Indeed, efficient room temperature electro-luminescence from Erbium-Oxygen co-doped Silicon diodes has been reported. Moreover, the long spontaneous lifetime of the first excited state of erbium (about 1 ms), can certainly guarantee the achievement of a population inversion which is needed for an efficient light emission.

To fully understand all the aspects of the present invention, a schematic diagram of the mechanisms connected to electrical pumping of Erbium ions is shown in Figures 1, 2a, 2b, 3a and 3b.

A room temperature electro-luminescence at 1.54  $\mu\text{m}$  wavelenght can be achieved when Er ions are incorporated into a p-n diode junction.

A known solution is disclosed for instance in the US patent No. 5,107,538 that relates to an optical waveguide system comprising a rare-earth Si-based optical device.



This device, however, produces a luminescence only at a temperature close to 4 K and the efficiency of the light emission is extremely reduced at room temperature. Moreover, no teachings may be traced in this documents about the rare-earth ions location inside the junction.

- 5 Therefore, the light emission obtained by this technology is insufficient for implementing commercial devices and no electro-optical products on Silicon are known on the market.

The object of the present invention is to provide a new semiconductor device having structural and functional features to allow the  
10 implementation of a coherent light emitting source into a semiconductor substrate including a rare-earth ions doped junction.

A further object of the present invention is to provide means for allowing optical interconnections intra-chip or between chips.

- 15 A further object of the invention is to provide a single chip integrated semiconductor laser device.

Another object of the present invention is to provide a new semiconductor device having structural and functional features to allow the implementation of a coherent light emitting source in Silicon.

- 20 A further object of the invention is to provide a single chip integrated Silicon laser device.

Moreover, the aim of the invention is that of providing an electrically pumped optical amplification and laser action at room temperature.

#### Summary of the invention

- 25 The solution idea on which the invention is based is that of obtaining an electrically pumped optical amplification, and laser action using Erbium-doped crystalline Silicon. The semiconductor device according to the invention comprises an Erbium-doped p-n junction integrated within a semiconductor cavity or waveguide.

- 30 The invention allows to combine impact excitation of Er ions by hot carriers in the depletion layer of the reverse biased junction with a proper Er doping and electric field distribution.

Electro-optical amplification is provided by the embodiment of all the Er ions within the depletion layer of the semiconductor device providing also proper acceleration of the carriers before they enter the Er-doped region.

- 5 According to this solution idea the invention relates to a semiconductor device defined by the enclosed claim 1.

The invention relates also to a semiconductor laser device according to claim 11.

- 10 Moreover, the invention relates to a method for manufacturing a semiconductor device as defined in claim 21.

The features and the advantages of the semiconductor device and corresponding manufacturing method according to the invention, will become clear from the following description of a preferred embodiment given as non-limiting example with reference to the attached drawings.

15 Brief description of the drawings

Figure 1 shows a schematic diagram of 4f electronic levels of an Erbium ion and the transitions giving rise to a 1.54  $\mu\text{m}$  light emission;

Figures 2a and 2b show the excitation mechanism for rare earth ions in crystalline Silicon, the specific case of Er ions is illustrated;

- 20 Figures 3a and 3b show the de-excitation mechanisms for rare earth ions in crystalline Silicon;

Figures from 4 to 8 are schematic cross sectional views of the semiconductor device according to the invention during the subsequent steps of its manufacturing process;

- 25 Figure 9 shows a cross-sectional perspective view of a semiconductor device according to the present invention;

Figure 10 shows a schematic view of a vertical cross-section of the semiconductor device of Figure 9 evidencing the location of the rare earth ions needed to achieve laser action according to the present

- 30 invention;

Figure 11 shows a schematic view of a dark region in the central depletion layer where Er ions are pumped by impact excitation according to the prior art;

Figure 12 shows a diagram of the doping concentration versus doping  
5 depth for the semiconductor device of the present invention;

Figure 13 shows a diagram of the electric field versus doping depth for the semiconductor device of the present invention.

#### Detailed description

With reference to the enclosed drawing, with 1 is globally and  
10 schematically shown a semiconductor device realised according to the present invention for electro-optic applications. The semiconductor material of the present invention is Silicon.

The process for manufacturing the semiconductor device 1 will now be disclosed. The specific features of the inventive semiconductor device 1  
15 will be discussed later for description convenience.

The manufacturing process is described hereinafter step by step.

A SOI (Silicon-On-Insulator) wafer is provided to be used as a substrate  
2 for the semiconductor device 1 according to the invention.

A known SIMOX or BESOI technology may be used to provide said SOI  
20 wafer.

However, instead of using a SOI wafer, the substrate for the semiconductor device 1 may simply comprise a double layer of a semiconductor material, for instance a first highly doped substrate layer and a second upper lightly doped epitaxial layer. In such a case the  
25 lower substrate layer would have a lower refraction index and would act as a reflective layer for the incident light.

The SOI substrate 2 is formed by a first lower monocrystalline layer 3, an oxide layer 4, and a second upper monocrystalline layer 5. The first and the second monocrystalline layers may be doped with a dopant  
30 having a first conductivity type, for instance N-type.

The second upper layer 5 is less doped than the first lower layer 3.

An oxide layer 7 is grown on top of the substrate 2, that is over the second upper monocrystalline layer 5.

A photolithographic process step is then provided to define an aperture 8 in said oxide layer 7 and to selectively realise a doped region 10. The  
5 dopant used for this region 10 has an opposite conductivity type, for instance P-type.

A masked implantation step of B ions in the upper layer 5 allows to realise this p+ doped region 10, as shown in Figure 5.

Through the same mask a rare-earth ions doped region 9 is formed.  
10 For example, a ion implantation process step is performed to obtain a region 9 under said p+ doped region 10, as shown in Figure 5. Preferably, said rare earth ions are selected from the group comprising Erbium (Er). A proper co-doping with other impurities, such as O, F, N, may also be used.

15 Rare earths (RE) incorporation can be achieved using different techniques, such as ion implantation, Molecular Beam Epitaxy (MBE), Chemical Vapor Deposition (CVD), ion assisted deposition, Si-epitaxial regrowth on shallow RE-doped regions. Obviously, different techniques may require different process steps.

20 The region 9 is an N-type doped region and the stack formed by the regions 5, 9 and 10 form substantially a PN diode junction.

A skilled man may appreciate that the semiconductor device structure of the present invention is similar to a base-collector junction of a bipolar transistor.

25 Advantageously, according to the invention, all the implanted Er ions are incorporated in the depletion layer of the PN junction formed by the regions 5, 9 and 10, as clearly shown in Figure 13. Alternatively, all the implanted Er ions are incorporated in the depletion layer of the base collector region of said bipolar transistor.

30 A masked etching process step is then performed to protect the stacked regions 5, 9 and 10 and to etch the semiconductor at both sides of those regions 9 and 10 to provide a projecting stack region 6 formed just by the p+ doped region 10 and part of the region 5.

A dry or wet etching step may be used for etching the semiconductor.

A protective oxide layer 11 is deposited over the resulting stack, as shown in Figure 6.

5 This protective oxide layer 11 allows to envelope the stack 6 formed by the regions 9 and 10 by a material having a lower dielectric constant.

As a result, a laser cavity or waveguide is obtained on Silicon with the oxide layer 11 delimiting the sides of the waveguide and the buried oxide layer delimiting the bottom of the waveguide.

10 The device obtained with the inventive method allows to confine light in a two dimensional plane perpendicular to the direction of propagation of the electromagnetic wave. Hence, the semiconductor region containing the gain medium, that is the Erbium ions concentration, is surrounded by a cavity structure or waveguide delimited by a material having a lower refractive index.

15 We have disclosed an example to obtain a weveguide having substantially a rib elongated structure as shown in Figure 9. However, other examples may be proposed such as planar waveguides in which the lateral confinement is obtained for instance by shallow trenches filled by a lower refractive index material, or by heavily doped regions as  
20 one of the many possible alternatives.

The manufacturing process is carried on by a further masked implantation step of n-type dopants.

25 Using a suitable mask, not shown, a portion of the protective oxide layer 11 is removed over the upper substrate layer 5, close to the stack 6. N-type dopants, for instance P ions, are implanted in the upper layer 5 thereby forming contact n+ regions 19, as shown in Figure 7.

A further oxide layer is deposited over the whole semiconductor portion and a masked process is used to define contacts openings over the p+ region 10 and over the n+ regions 19.

30 A final deposition step of a metal layer, followed by a lithography step, is performed to define the metal contacts on the p+ and n+ regions 10 and 19 as shown in Figure 8.

The resulting structure is clearly shown in Figure 9 which is a schematic vertical cross-section and perspective view of the semiconductor device 1 including a cavity or waveguide and a p-n diode junction.

- 5 Let's now evaluate the specific features of the semiconductor device structure 1 obtained according to the process previously disclosed.

Er ions can be effectively pumped by electron-hole (e-h) recombination, under forward bias diode operation, at temperature below 200 K. However, a phenomenon known as Auger de-excitation and back energy  
10 transfer strongly reduces the efficiency of light emission at higher temperatures.

According to the invention, these negative effects are fully inhibited under reverse bias conditions thereby allowing to achieve strong light emission at room temperature.

- 15 In fact, all of the implanted Er ions are incorporated in the depletion layer of a p-n junction or, alternatively, in the depletion layer of the base collector region of the bipolar transistor.

Since the characteristic of the invention is the incorporation of the rare earth ions in a depletion layer, electrical pumping of these ions can be  
20 achieved in different device structures such as: Schottky diodes, bipolar transistors; MOSFET devices, etc.

Moreover, a sufficient acceleration space is provided before carriers either generated by tunneling in a reverse biased p-n junction or injected by the emitter-base junction of a transistor, enter the Er-doped  
25 regions: following this approach population inversion will be extended to all of the Er ions.

After having achieved laser operation at room temperature, an efficient electronic pumping effect can be maintained at room temperature according to the present invention.

- 30 Therefore, according to the invention, a proper semiconductor laser device may be realised incorporating the rare-earth ions in a laser cavity which presents low losses at the emission wavelength.

In this respect, the use of a Silicon substrate is certainly an advantage since Silicon semiconductor is almost transparent at the 1.54  $\mu\text{m}$  wavelength. Indeed, integrated Silicon waveguides using Silicon as the core material and Silicon Oxide ( $\text{SiO}_2$ ) as claddings have already been manufactured and present losses as low as 0.1 dB/cm.

According to the invention, rare-earth ions doping of these waveguides, within an integrated devices structure allowing electrical pumping of the rare earth ions, can be used to produce the laser cavity.

Diode operation at the diode breakdown threshold results in an intense light emission at 1.54  $\mu\text{m}$ , characterised by an internal quantum efficiency of about 0.1 %.

It may be demonstrated that in such a structure the Er ions are pumped to the excited levels as a result of impact excitation by hot carriers.

Impact excitation with hot carriers is provided to invert Er population rather than electron-hole recombination.

During pumping, since the Er ions are embodied in the depletion layer of a junction, the losses due to the free electrons will be fully inhibited and the laser action would benefit of the extremely low losses that intrinsic Silicon exhibit at 1.54  $\mu\text{m}$ .

This amplification gain at 1.54  $\mu\text{m}$  can overcome waveguide losses and laser action can be achieved if a proper cavity reflectors structure can be realised, as the inventive method has demonstrated.

In order to remark how to obtain a proper laser action reference is still made to the schematic view of Figure 9. The semiconductor device 1 is realised using a silicon on insulators (SOI) substrate 2 and the process previously disclosed. The stacked p-n junction 6 is doped with rare earth ions. Er pumping will result in light emission coupled to the fundamental modes of the cavity. This structure could be used both as an electrically pumped optical amplifier or as a laser, if proper feedback can be achieved. Cleaved output and input waveguide facets, or distributed Bragg reflector structures, can be suitably used to provide the feedback needed for laser action.

The most important limitation that the invention has overcome was due to an insufficient Er concentration in order to achieve a laser action at 1.54  $\mu\text{m}$  in the Er-doped Silicon substrate using an integrated waveguide.

- 5 Since Erbium in Silicon acts as a donor, a high concentration of free electrons in the region where Erbium sits is present. It should be noted that, in order to incorporate high Er concentration in Silicon semiconductor, co-doping with impurities such as O and F plays a fundamental role. However this co-doping also produces a strong donor  
10 activity of the Er ions resulting in a high concentration of free electrons in the region where Er sits.

When Erbium is incorporated within a structure, such as the channel waveguide previously disclosed, the strong concentration of free electrons will produce, by the plasma dispersion effect, strong losses  
15 which would make impossible the achievement of a net gain. Indeed, free carrier concentration has to be maintained below  $10^{17}/\text{cm}^3$  to achieve low losses.

In fact, due to the donor behavior of Er, both the real and the imaginary part of the refractive index are strongly affected by the high free carrier  
20 concentration, and the mode tends to escape from the region where Er sits. Moreover, effective loss as high as  $\sim 200 \text{ cm}^{-1}$  can be obtained.

A problem to be solved results from the use of impact excitation of Er ions in reverse biased p-n junctions because of the existence of a "dark region" in the central portion of the depletion layer where carriers have  
25 not enough energy to pump Er ions.

It has been experimentally demonstrated by S. Coffa, G. Franzò, F. Priolo, A. Pacelli, A. Lacaita, Appl. Phys. Lett. 73, 93 (1998) that a region of about 400 Å in the central portion of about 1000 Å thick depletion layer, is dark.

- 30 Such a behavior is schematically shown in Figure 11. In fact, the peculiar feature of impact excitation is due to the existence of a threshold. If the energy of the carrier is lower than that required to



promote the Er ions to the first excited state (0.8 eV) the process cannot occur.

5 A second problem is that the Er ions sitting outside the depletion layer cannot be pumped by this mechanisms, hence will not be excited, but will adsorb light at 1.54  $\mu\text{m}$ .

The Er population cannot hence be inverted in the central part of the diode since there the energy of the carriers, produced by band to band tunneling and then accelerated by the strong electric field present at the junction, is not sufficient to pump Er.

10 An effective pumping of Er ions in order to achieve population inversion and the capability of maintaining low losses in the Er doped waveguides is achieved by the inventive structure. How the invention solves these two problems is examined in details hereinafter.

15 The inventive device and method solve all the previously remarked problems by incorporating all the implanted Er ions in the depletion layer of the p-n junction and providing:

1. a sufficient acceleration space before carriers enter the Er-doped regions.
2. population inversion extended to all the Er ions.
- 20 3. Inhibition of loss due to free electrons just because the Erbium ions are embodied in the junction depletion layer. The laser action would benefit of the extremely low loss that intrinsic Si exhibits at 1.54  $\mu\text{m}$ . Er has been placed where the maximum of the mode sits.

25 Since the Erbium ions sit in the depletion region, the free carrier concentration strongly decreases and effective loss as low as  $0.6 \text{ cm}^{-1}$  has been evaluated.



**CLAIMS**

1. Semiconductor device for electro-optic applications of the type including at least a rare-earth ions doped P/N junction integrated on a semiconductor substrate, a cavity or a waveguide and a coherent light source, characterised in that said coherent light source is obtained incorporating said rare-earth ions in the depletion layer of said P/N junction.
2. Semiconductor device according to claim 1, wherein said P/N junction is reverse biased.
3. Semiconductor device according to claim 1, wherein said rare-earth ions doped P/N junction is the base-collector region of a bipolar transistor.
4. Semiconductor device according to claim 1, wherein said rare-earth ions are Erbium ions.
5. Semiconductor device according to claim 1, wherein said cavity or waveguide includes said P/N junction and is partially enveloped by a protective layer having a lower dielectric constant with respect to said junction.
6. Semiconductor device according to claim 1, wherein a buried reflecting layer is provided to delimit the bottom of said waveguide.
7. Semiconductor device according to claim 1, wherein said semiconductor substrate is a SOI substrate.
8. Semiconductor device according to claim 1, wherein said semiconductor substrate is an epitaxial layer covering an heavily doped substrate layer.
9. Semiconductor device according to claim 1, wherein said cavity or waveguide has a rib elongated structure projecting from the semiconductor surface.
10. Semiconductor device according to claim 1, wherein said semiconductor is Silicon.

11. Semiconductor laser device comprising at least a rare-earth ions doped P/N junction integrated on a semiconductor substrate, a cavity or waveguide and a coherent light emitting source, characterised in that said device comprises includes a biasing device and incorporates said rare-earth ions in the depletion layer of said P/N junction.
12. Semiconductor laser device according to claim 10, wherein said biasing device is a bipolar transistor and said P/N junction is the base-collector region of said bipolar transistor.
13. Semiconductor laser device according to claim 10, wherein said P/N junction is reverse biased.
14. Semiconductor laser device according to claim 10, wherein said rare-earth ions are Erbium ions.
15. Semiconductor laser device according to claim 10, wherein said cavity or waveguide includes said P/N junction and is partially enveloped by a protective layer having a lower dielectric constant with respect to said junction.
16. Semiconductor laser device according to claim 10, wherein said cavity or waveguide has a rib elongated structure projecting from the semiconductor surface.
17. Semiconductor laser device according to claim 10, wherein said semiconductor substrate is a SOI substrate.
18. Semiconductor laser device according to claim 10, wherein said semiconductor substrate is an epitaxial layer covering an heavily doped substrate layer.
19. Semiconductor laser device according to claim 10, wherein a buried reflecting layer is provided to delimit the bottom of said waveguide.
20. Semiconductor laser device according to claim 10, wherein said semiconductor is Silicon.
21. A method for manufacturing a semiconductor device for electro-optic applications, said device including at least a rare-earth

ions doped P/N junction integrated on a semiconductor substrate, characterised in that of providing a cavity or waveguide in said semiconductor substrate and a coherent light emitting source incorporating said rare-earth ions in the depletion layer of said P/N junction.

22. Method according to claim 21, wherein a biasing device is also provided to bias said P/N junction.

23. Method according to claim 21, wherein said biasing device is a bipolar transistor and said rare-earth ions doped P/N junction forms the base-collector region of said bipolar transistor.

24. Method according to claim 21, wherein said rare-earth ions are Erbium ions.

25. A method for manufacturing a semiconductor laser device for electro-optic applications, said device including at least a rare-earth ions doped P/N junction integrated on a semiconductor substrate, characterised in that of providing a cavity or waveguide in said semiconductor substrate and a coherent light emitting source comprising a biasing device and a concentration of said rare-earth ions in the depletion layer of said P/N junction.

26. Method according to claim 25, wherein said biasing device is a bipolare transistor and said rare-earth ions doped P/N junction forms the base-collector region of said bipolar transistor.

27. Method according to claim 25, wherein said rare-earth ions are Erbium ions.



**ABSTRACT**

The invention relates to a semiconductor device for electro-optic applications of the type including at least a rare-earth ions doped P/N junction integrated on a semiconductor substrate. This device  
5 may be used to obtain laser action in Silicon and comprises a cavity or a waveguide and a coherent light source obtained incorporating the rare-earth ions, and specifically Erbium ions, in the depletion layer of said P/N junction.

The junction may be for instance the base-collector region of a  
10 bipolar transistor and is reverse biased.

(Fig. 9)





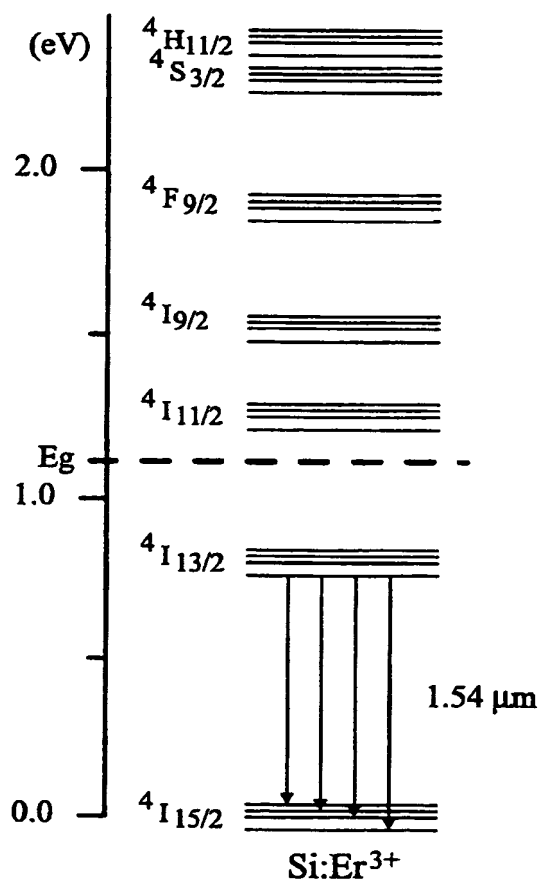


Fig. 1

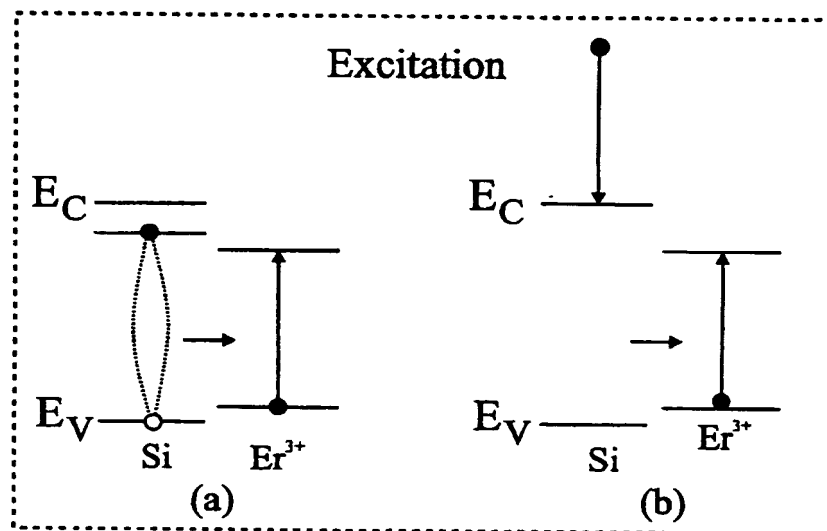


Fig. 2

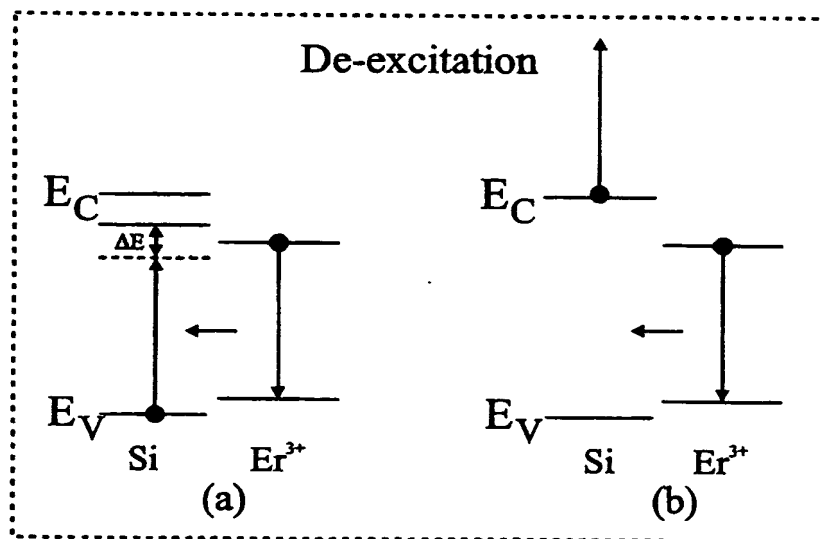


Fig. 3

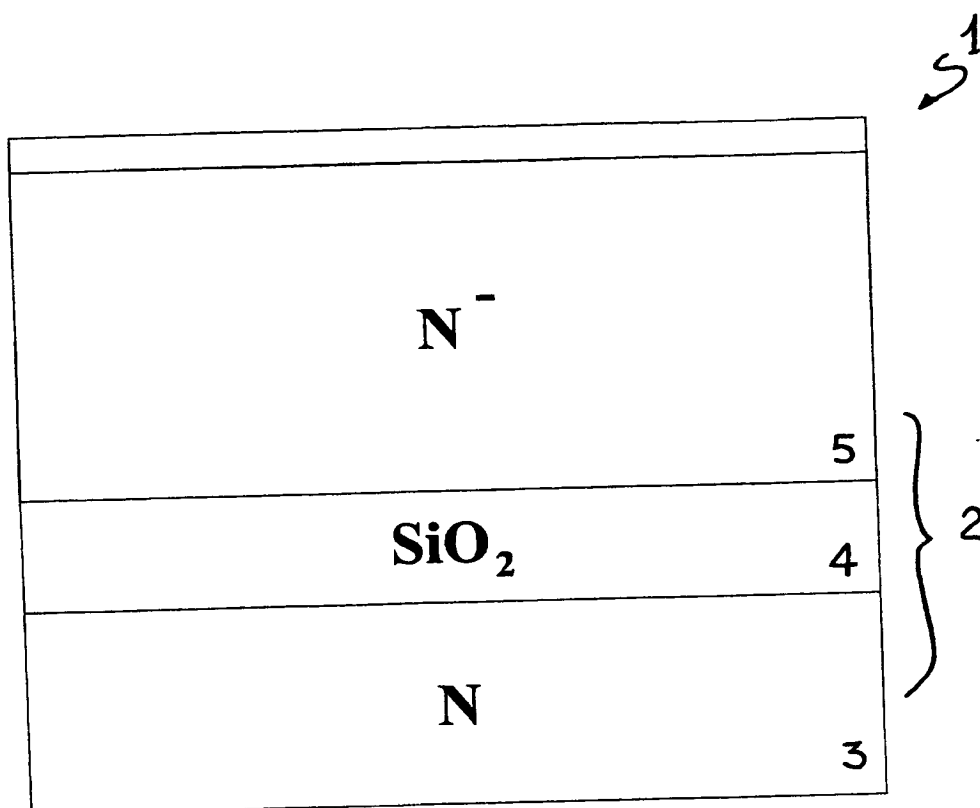


Fig. 4

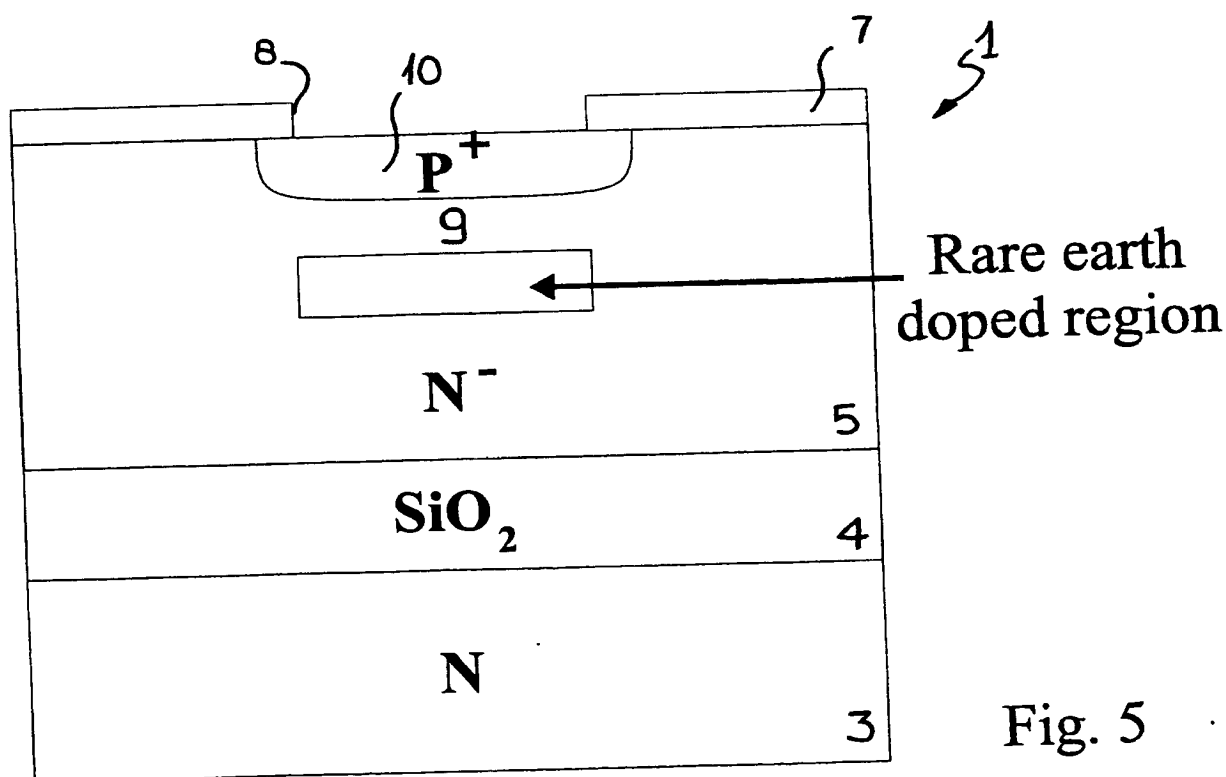
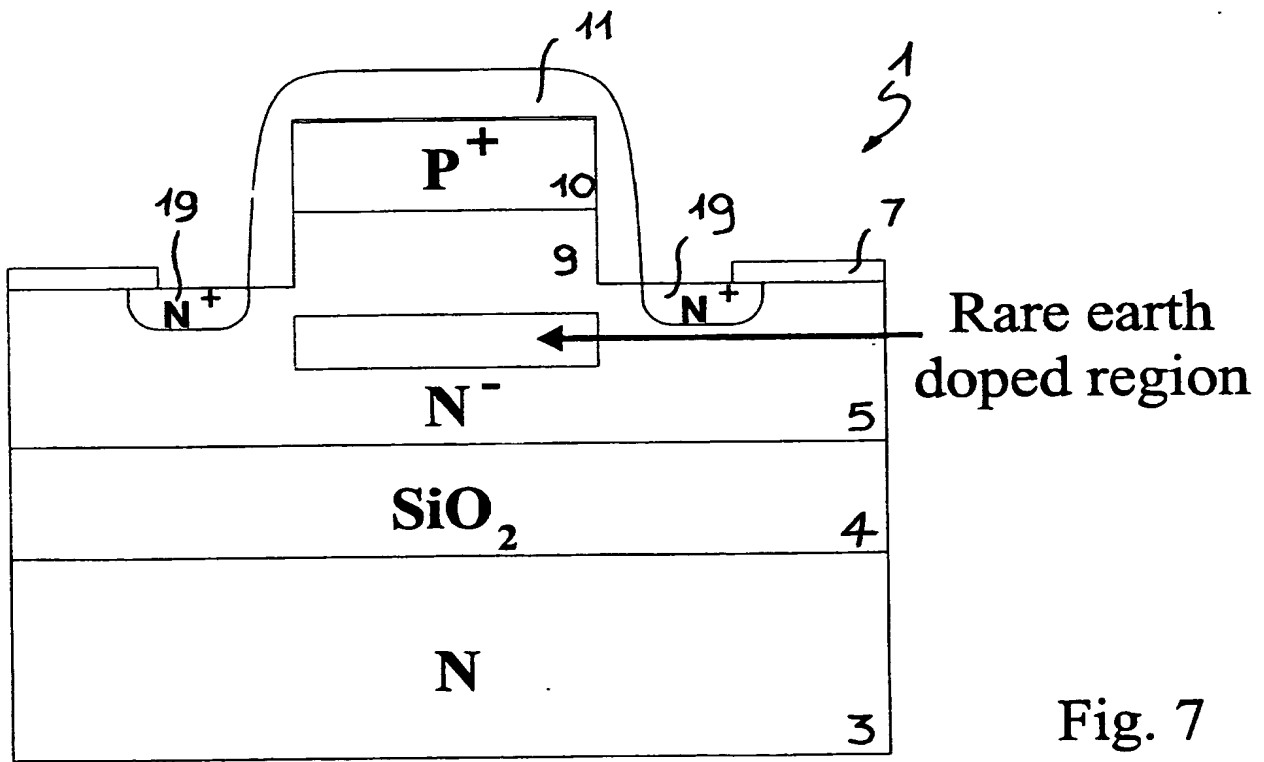
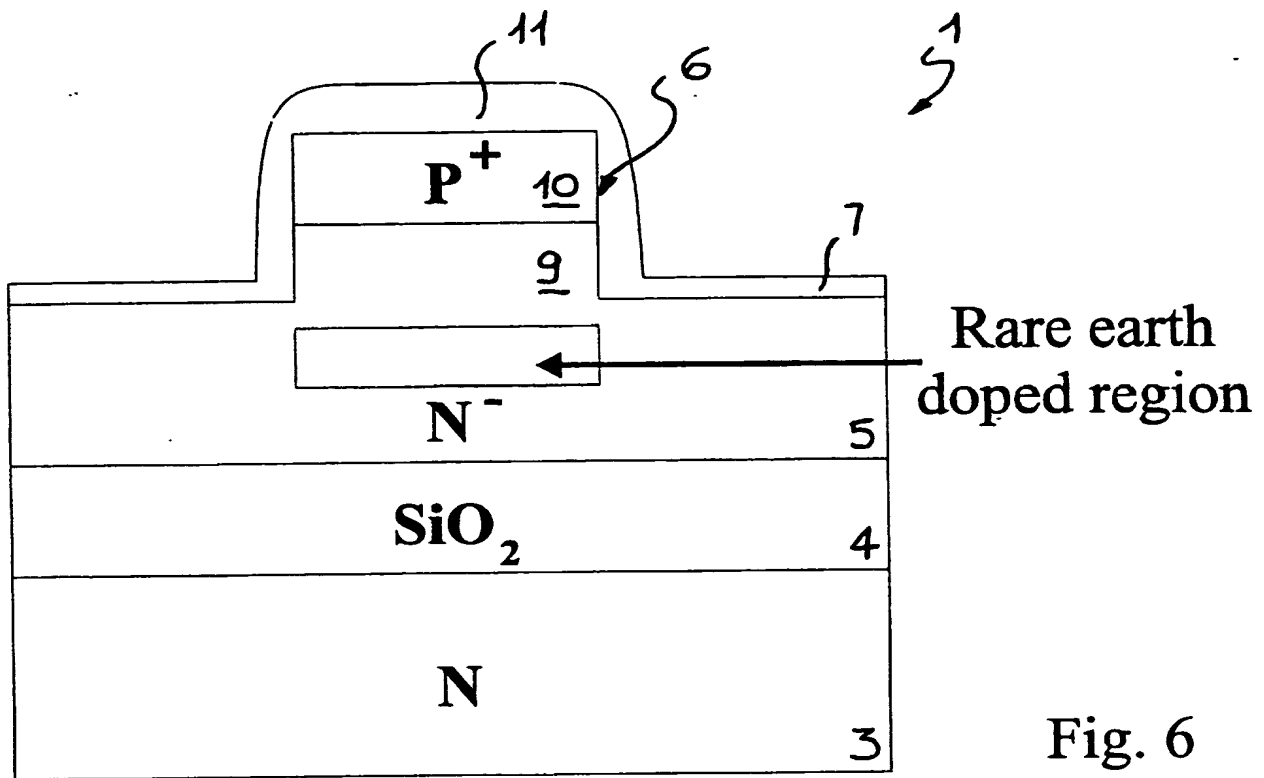
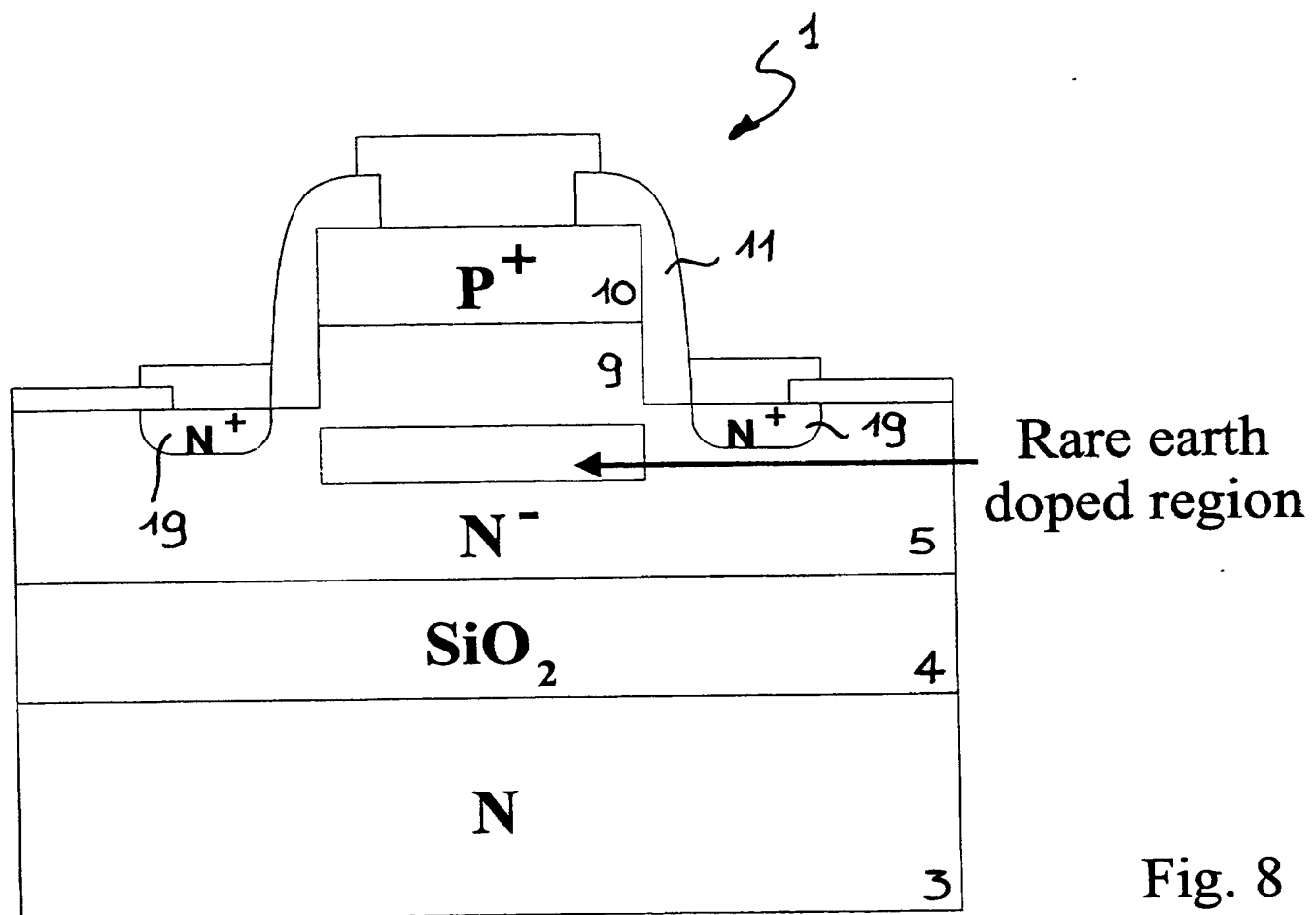


Fig. 5





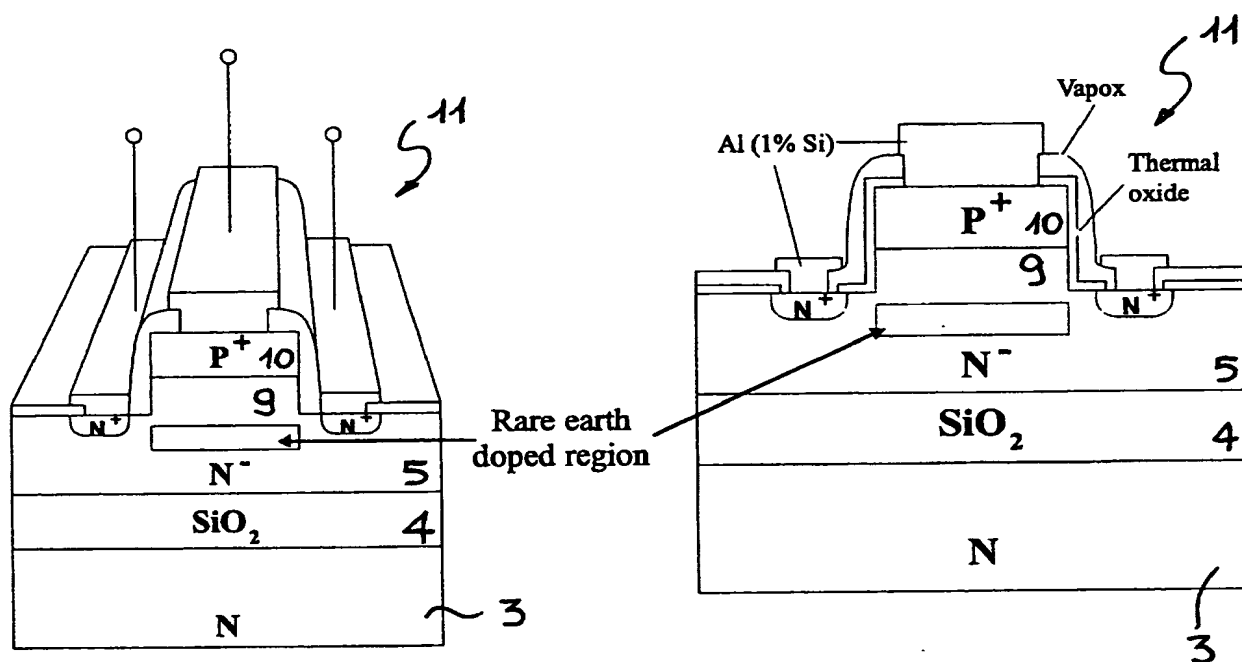


Fig. 9

Fig. 10

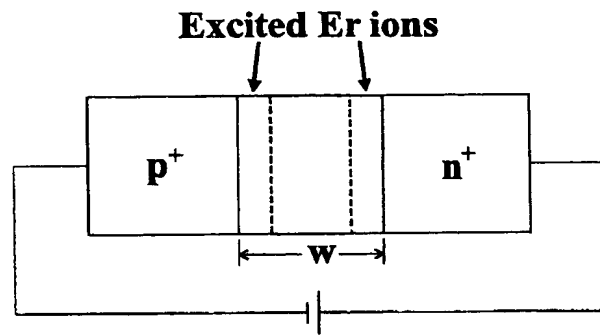


Fig. 11

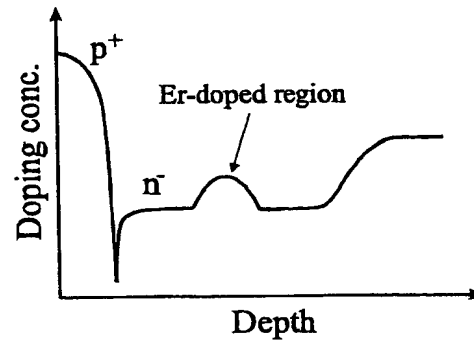


Fig. 12

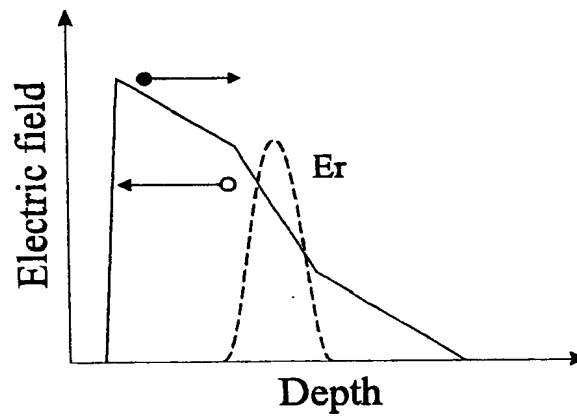


Fig. 13